

Trabajo Fin de Grado

Estudio Técnico de Viabilidad de conversión de
vehículo convencional a eléctrico

Autor

Marcos Meseguer Laborda

Director

Juan Luis Villa Gazulla

Escuela de Ingeniería y Arquitectura
2019

RESUMEN

Estudio Técnico de Viabilidad de conversión de vehículo convencional a eléctrico.

En este trabajo de fin de grado (TFG), se analizan los elementos principales eléctricos y electrónicos de un vehículo eléctrico para su posible instalación en vehículos que fueron construidos inicialmente con un motor de combustión interna y pensados para su conducción con dicho Motor. Para realizar el estudio, se ha tomado como referencia un vehículo antiguo (Renault 4 TL), que por su características físicas y estructurales podía ser adecuado para una conversión.

Para la realización del TFG se realiza inicialmente un modelo dinámico y energético del vehículo con los ciclos estandarizados, así como con ciclos que realizaría el vehículo de manera cotidiana. Con la potencia y energía necesarias calculadas a partir de este modelo, se procede a la selección y modelado en el programa de simulación Matlab & Simulink de la compañía MathWorks® del motor eléctrico y la batería que se instalarían en el vehículo.

La selección de ambos elementos se realiza mediante la comparación de las características de los diferentes motores y baterías que se instalan en los vehículos eléctricos y decidiendo por el precio y dichas características cual es el más adecuado para el vehículo propuesto. Una vez seleccionado ambos elementos se seleccionan los elementos necesarios para la alimentación del motor a partir de la batería y su control siguiendo un criterio similar.

Tras la selección de la batería se estudian los sistemas que se utilizan para el correcto funcionamiento de la batería para que no sufra daños durante su vida útil y diferentes tipos de carga que ese tipo de batería en específico puede utilizar y se estiman los tiempos de carga necesarios según el tipo de carga utilizada.

Con los elementos que componen el vehículo seleccionados, se procede a elegir el tipo de cable y protecciones necesarias para la conexión de los diferentes elementos del vehículo.

Finalmente se analizan las características principales que tendría el vehículo tras su conversión, Potencia, Energía consumida, Autonomía, Velocidad máxima, emisiones de Co2 y precio aproximado de la conversión y se comparan con vehículos, de similar potencia a la que tendría el vehículo tras la conversión, que a fecha de 2018 se encontraban y eran representativos del mercado.

Con los resultados obtenidos de la realización del TFG se realizan las conclusiones pertinentes y se proponen diferentes posibles trabajos a realizar de desarrollos y aspectos de investigación con relación al tema tratado en el TFG que serían interesantes de tratar.

Índice

1. Introducción	6
2. Modelo Dinámico del vehículo.....	8
3. Estudio energético y dinámico	9
4. Selección del motor eléctrico.....	16
4.1 Implementación de un PMLBDC en Simulink.....	19
4.1.1 Control de los sensores Hall.....	20
4.1.2 Estimación de los parámetros que modelan el motor.....	22
4.1.3 Control de velocidad.....	24
5. Selección de batería.....	30
5.1 Comparación de las baterías basadas en níquel y baterías basadas en litio.....	30
5.2 Dimensionamiento de la batería.....	33
5.3 Implementación de una batería Li-ion en Simulink.....	36
6. Sistema de gestión de batería	39
6.1 Balanceado de celdas.....	39
6.2 Estado de salud.....	40
6.3 Estimación del SOC.....	41
6.4 Selección BMS.....	42
7. Sistema de recarga de la batería.....	44
7.1 Carga lenta y moderada.....	46
7.2 Carga rápida.....	48
7.3 Estimación de tiempos de carga.....	49
8. Convertidores de potencia.....	51
8.1 Convertidor DC/DC con tensión de salida máxima 400 V.....	51
8.2 Convertidor DC/DC con tensión de salida de 12 V.....	53
9. Cableado y protección.....	55
10. Características finales de vehículo.....	57
10.1 Peso.....	57
10.2 Precio estimado de la conversión.....	57
10.3 Estudio energético y dinámico final.....	57
10.4 Comparativa de vehículos en el mercado con similares características.....	61
11. Conclusiones.....	63
Propuestas de desarrollo futuro.....	64
12. Bibliografía.....	65
Anexo I Calculo de la ecuación del valor mínimo de la bobina y el condensador para el convertidor bidireccional Buck-Boost.....	66
Anexo II Tablas de comparación de vehículos comerciales.....	67
Anexo III Modelos de Simulink y “Scripts” de Matlab planteados.....	71

Anexo III.1 Modelos y “Scripts” para el estudio dinámico y energético	71
Anexo III.2 Modelo para estimar tiempos de carga de la batería	74
Anexo III.3 Modelo del motor+Inversor+Convertidor+Batería.	75

Índice de figuras

Figura 1 ciclo completo WLTC clase 2 en Simulink.	9
Figura 2 Bloques para formar el ciclo NEDC completo en Matlab.....	10
Figura 3 Ciclo completo NEDC en Simulink.	10
Figura 4 datos de los primeros 32 tramos del recorrido corto en el programa “Garmin BaseCamp”.	11
Figura 5 perfiles de velocidad y pendiente del ciclo largo en Simulink.	12
Figura 6 perfiles de velocidad y pendiente del ciclo intermedio en Simulink.....	13
Figura 7 perfiles de velocidad y pendiente del ciclo Corto en Simulink.	13
Figura 8 Calculo del par eficaz para un ciclo según el fabricante Omron en el documento “Servo Motor Selection Flow Chart”.	14
Figura 9 Comparación de mapa de eficiencias entre a) 48/8 PMSM b) 12/8 PMSM c) 48/36 IM d) 12/8 RM artículo [2]......	16
Figura 10 Estator de PMBLDC de la compañía Lymotor.	17
Figura 11 PMSM utilizado por el coche Chevrolet Volt.....	17
Figura 12 Datos técnicos dados por el fabricante (Zytec).....	17
Figura 13 Curvas de par, velocidad y potencia a 250 V dadas por el fabricante (Zytec).	18
Figura 14 Rotación del motor [4]......	19
Figura 15 Circuito equivalente de PMBLDC cuando está conectado entre dos fases [3].	19
Figura 16 Secuencia de conmutación de un PMBLDC [4].	20
Figura 17 esquema inversor de puente trifásico IGBT-diodos del bloque “Inverter	20
Figura 18 Fase de alimentación según los sensores hall activos del bloque “Permanent Magnet.....	21
Figura 19 Herramienta de cálculo a partir de las especificaciones de los fabricantes del bloque “Permanent Magnet Synchronous Machine” de Simulink.....	22
Figura 20 Parámetros iniciales para definir el bloque “Permanent Magnet Synchronous Machine” de Simulink.	23
Figura 21 Parámetros finales para definir el bloque “Permanent Magnet Synchronous Machine” de Simulink.	24
Figura 22 comparativa de la respuesta del motor de los parámetros iniciales con los finales en Simulink.	24
Figura 23 PWM “up-down-counter” de la documentación de Matlab del “PWM Generator”.....	25
Figura 24 Diagrama de bloques del sistema regulado Simulink.....	25
Figura 25 Función de transferencia de un PMBLDC con $G(S) = V_i/\omega$ [3].	26
Figura 26 Interfaz de la máscara utilizada en Simulink para calcular la función de transferencia con los parámetros necesarios para su cálculo leídos automáticamente.	27
Figura 27 función de transferencia de la planta calculada con “PIDcalculation” en Matlab.	27
Figura 28 Respuesta del controlador en la aplicación “PID tuner” de Matlab con las constantes ya optimizadas.	28
Figura 29 Par ciclo NEDC en el motor	28
Figura 30 Comparativa de la referencia del ciclo NEDC con la velocidad dada por el motor.	29
Figura 31 Comparación de los diferentes métodos de almacenamiento de energía química en las baterías más típicas según los datos normalizados y medias logarítmicas del artículo [7].	31
Figura 32 Comparativa entre las diferente baterías Ion litio con los valores normalizados del artículo [8].	32
Figura 33 Rango de operación del estado de carga de las baterías Li-ion según la web “electropaedia” con dominio https://www.mpoweruk.com	32
Figura 34 Energía consumida durante el ciclo largo en Simulink.	35

Figura 35 Características típicas de descarga de la documentación de Matlab.	36
Figura 36 Parámetros de la batería (derecha) y parámetros de uno de los módulos (izquierda) que la forman mediante el bloque "Battery" de Simulink.	37
Figura 37 Modelo Para comprobar funcionamiento de la batería en Simulink.	38
Figura 38 Gráficas de descarga de la batería en Simulink.	38
Figura 39 área de funcionamiento segura del Artículo [9].	39
Figura 40 Causas del desbalanceado de las celdas de una batería y sus posibles soluciones del artículo [10].	40
Figura 41 Ejemplo topología modular BMS con 2 circuitos integrados del manual "Electric Vehicle Management System V3" de la compañía ZEVA.	43
Figura 42 Conexión A norma UNE-EN 61851-1:2012.	45
Figura 43 Conexión B norma UNE-EN 61851-1:2012.	45
Figura 44 Conexión C norma UNE-EN 61851-1:2012.	46
Figura 45 Características típicas de carga de una celda Li-ion. Gráfica modificada (rojo) del artículo [8].	46
Figura 46 Especificaciones básicas de "4th Generation 6.6KW HK-L Series OBC" mostradas en la web del fabricante "TC charher" con dominio "http://www.tccharger.com".	47
Figura 47 Ejemplo de sistema aislado típico usado para estaciones de carga rápida definido en la norma UNE-EN 61851-23:2015.	48
Figura 48 Comparativa carga rápida lenta y moderada mediante Simulink.	49
Figura 49 Esquema de niveles de tensiones del vehículo.	51
Figura 50 Convertidor Buck-Boost bidireccional del artículo [13].	51
Figura 51 Convertidor Buck-Boost bidireccional en cascada del artículo [13].	52
Figura 52 Ecuaciones de intensidad del convertidor Buck-boost bidireccional del artículo [13].	52
Figura 53 efecto del "duty" en el rizado de tensión. Gráfica realizada en Matlab.	53
Figura 54 Selección de cables y fusibles.	55
Figura 55 ciclo completo WLTC clase 3 con velocidad superior a 120 km/h en Simulink.	58
Figura 56 Comparativa de la referencia del ciclo intermedio con la velocidad dada por el motor.	59
Figura 57 Actuación de la batería durante el ciclo intermedio en Simulink.	59
Figura 58 Comparativa de la referencia del ciclo WLTC clase 3 con velocidad superior a 120 km/h, con la velocidad dada por el motor en Simulink.	60
Figura 59 Actuación de la batería durante el ciclo WLTC clase 3 con velocidad superior a 120 km/h en Simulink.	61
Figura 60 Comparación del vehículo con vehículos comerciales de potencia similar.	62
Figura 61 Modelo de Simulink para el estudio energético y dinámico final en Simulink.	71
Figura 62 Subsistema del bloque modelo físico en Simulink.	71
Figura 63 mascara con los datos del vehículo en Simulink.	72
Figura 64 "Dialog Box" definido de la máscara en Simulink.	72
Figura 65 Código para la inicialización de variables a través de la máscara en Simulink.	73
Figura 66 función del bloque "MATLAB function" en "Script" de Matlab desde Simulink.	74
Figura 67 Modelo de la batería para la estimación del tiempo de carga lento, moderado y rápido en Simulink.	74
Figura 68 Modelo del controlador PID con la referencia en Simulink.	75
Figura 69 Bloque planta donde se encuentran el modelo de la batería, el convertidor y el motor en Simulink.	75
Figura 70 Modelo del convertidor, bloque Buck-Boost bidireccional en Simulink.	75
Figura 71 "Dialog Box" de la máscara PID estimation en Simulink.	76
Figura 72 "Script" de la función PIDCalculation, "Script" de Matlab.	77
Figura 73 función Decodificador realizada mediante "Matalab-function", en "Script" de Matlab desde Simulink.	79

Índice de tablas

<i>Tabla 1 Parque de turismos según cilindrada y años de antigüedad (agregado). Año 2018. de las tablas Excel proporcionadas por la DGT "Parque de vehículos - Tablas Auxiliares Anuario – 2018"</i>	6
<i>Tabla 2 Datos necesarios para selección de motor y batería.</i>	15
<i>Tabla 3 puertas del inversor trifásico a activar según los sensores hall activos.</i>	21
<i>Tabla 4 puertas del inversor trifásico a activar según los sensores hall activos para invertir el sentido de giro.</i>	21
<i>Tabla 5 Comparación de parámetros de las baterías de Níquel-cadmio, Níquel-Metal-Hidruro y Ion litio.</i>	33
<i>Tabla 6 Consumo energético sistemas auxiliares en situación más desfavorable (De noche, con luces encendidas y con radio enchufada).</i>	33
<i>Tabla 7 Parámetros de los módulos de la batería seleccionada "LG CHEM Lithium Ion Battery".</i>	34
<i>Tabla 8 Datos del ciclo largo entre diferentes puntos de carga.</i>	35
<i>Tabla 9 tiempos estimados de carga de la batería.</i>	50
<i>Tabla 10 Tablas realizadas para la asignatura de Movilidad eléctrica (2018 - 2019) del grado de ingeniería eléctrica de la universidad de Zaragoza, para el trabajo "Comparativa vehículos de bajas emisiones frente a vehículos de combustión interna" realizado por Marcos Meseguer Laborda, Autor de este Trabajo de fin de grado y César Moreno Argüelles en 2018 en la que se definen las características de vehículos ligeros comerciales.</i>	69
<i>Tabla 11 Características comparables de modelos de vehículos con similar potencia al vehículo en el que se realizaría la conversión.</i>	70

1.Introducción

En un parque de vehículo como el español en el que a año de 2018, los vehículos denominados como turismos, con más de 10 años de antigüedad representan el 62 % del parque y con las nuevas normativas que cada vez limitan más la compra y utilización de vehículos con combustibles fósiles, es interesante conocer la posibilidad de realizar conversiones de estos vehículos a eléctricos para tener una alternativa a la compra de vehículos eléctricos en un mercado en el cual las opciones de compra de dichos vehículos es muy limitada frente a la de los convencionales.

Antigüedad	Hasta 1199 cm	1200-1599 cm	1600-1999 cm	Mas de 1999 cm	Totales
Hasta 4 años	1266558	2704823	1145861	398210	5515452
De 5 a 9 años	288977	1981012	1174740	283730	3728459
De 10 a 14 años	269799	2602531	2878803	763106	6514239
De 15 a 19 años	265432	1309307	2352194	473701	4400634
De 20 y más años	1198240	1186986	1115072	415069	3915367
Total	3289006	9784659	8666670	2333816	24074151

Tabla 1 Parque de turismos según cilindrada y años de antigüedad (agregado). Año 2018. de las tablas Excel proporcionadas por la DGT "Parque de vehículos - Tablas Auxiliares Anuario – 2018".

El objetivo del TFG consiste en conocer en qué grado es posible la conversión de los vehículos convencionales a eléctricos utilizando como referencia un vehículo con una elevada antigüedad como el Renault 4 TL.

Para realizar el TFG se utiliza como base lo explicado en el Libro [1] en el que se realiza una explicación de los diferentes tipos de vehículos de emisiones reducidas que existen, de los elementos principales que los componen y se definen las características que modelan el comportamiento dinámico del vehículo las cuales se han utilizado para realizar el apartado 2, además, se han utilizado los diferentes artículos y libros indicados en la bibliografía para obtener los conocimientos adecuados para realizar el resto de los apartados. En cada apartado, si se ha utilizado una información específica del artículo o libro, se indica adecuadamente cual ha sido la información utilizada y la bibliografía a la que pertenece.

Las herramientas utilizadas para la realización de este TFG han sido para el modelado y simulación, el programa Matlab & Simulink de la compañía MathWorks®, para la realización de las tablas y la edición de algunos de los datos obtenidos mediante la simulación, el programa Office Excel perteneciente al producto de suscripción Microsoft Office 365 ProPlus de la compañía Microsoft®, Para la obtención de los datos de los ciclos no estandarizados del vehículo se ha utilizado un GPS de la marca Garmin® y el programa Garmin Base Camp de la misma compañía. Para la redacción se ha utilizado el programa Office Word perteneciente al producto de suscripción Microsoft Office 365 ProPlus de la compañía Microsoft®. Para hacer la Figura 49 "Esquema de niveles de tensiones del vehículo." Se ha utilizado el programa de diseño gráfico AutoCad 2020 perteneciente a la compañía AutoDesk®.

Una breve explicación de los diferentes apartados que componen este TFG es:

- Apartado 2: Análisis de las ecuaciones que definen el modelo dinámico del vehículo y definición de las características del vehículo necesarias para realizar el modelo.
- Apartado 3: Se realiza a partir del apartado anterior el modelo dinámico del vehículo y se analiza la energía, la potencia, el par y la velocidad de los ciclos estandarizados y los ciclos obtenidos mediante GPS.
- Apartado 4: se selecciona el que se considera el motor más adecuado para el vehículo y se realiza un modelo del motor con su inversor y controlador calculando las constantes del PID para que sea adecuado para el modelo del motor.

- Apartado 5: Se selecciona el tipo de batería a utilizar, se dimensiona la batería para que cumpla, en la mejor medida posible, las condiciones físicas y energéticas para la conversión del vehículo y se realiza un modelo de la batería dimensionada.
- Apartado 6: Estudio de las tareas más importantes de un sistema de gestión de batería y se selecciona uno para la batería dimensionada en el apartado 5.
- Apartado 7: Estudio de los tipos de carga de baterías del vehículo y de los componentes que se instalan en el vehículo para dichas cargas. Se realiza una estimación de los tiempos de carga modificando el modelo de la batería del apartado 5.
- Apartado 8: Estudio y selección de los convertidores de potencia necesarios para alimentar los diferentes elementos del vehículo.
- Apartado 9: selección del tipo de cableado y protecciones para el funcionamiento del vehículo de manera segura.
- Apartado 10: Estimación aproximada del precio que tendría la conversión con todos los elementos seleccionados, unión de los modelo del motor con su controlador e inversor del apartado 4 con la batería del apartado 5 mediante el modelo del convertidor Buck-Boost bidireccional planteado en el apartado 8 que permite realizar un estudio energético de los elementos seleccionados y comparativa de las características del vehículo con otros vehículos que se encontraban, o se encuentran, en el mercado en 2018.
- Apartado 11: Las conclusiones que se pueden obtener de la realización del resto de apartados y propuestas para otros posibles trabajos
- Apartado 12: Lista bibliográfica con los artículos y revistas utilizados para la realización del TFG compuesta por el autor, el nombre del artículo o libro, editorial con número de referencia del artículo en el caso que exista y fecha de publicación.
- Anexo I: Se explica el proceso de la obtención de las ecuaciones para el cálculo del valor mínimo de la bobina y el condensador 2, del convertidor planteado en el subapartado 8.1.
- Anexo II: Tablas utilizadas para la realización del subapartado 10.4 compuestas por las características a comparar de los vehículos.
- Anexo III: Conjunto de modelos y “Scripts” de Matlab y Simulink realizados durante el transcurso del TFG.

2. Modelo Dinámico del vehículo.

Para realizar las pruebas del modelo dinámico del vehículo (Renault 4 TL) se toma en primera instancia los datos originales del vehículo, es decir con un motor de combustión interna de 38 CV.

Para realizar las pruebas del modelo físico los datos necesarios del vehículo son:

- Peso máximo autorizado: $m = 1090$ kg (actualmente llamada masa máxima autorizada)
- Área frontal enfrentada al aire: $A = 2.3$ m²
- Radio de la rueda: $R = 0.27$ m (Neumático 135/80 R13)
- Coeficiente Aerodinámico: $C_d = 0.43$

Estos datos, excepto el coeficiente aerodinámico, son los proporcionados por el fabricante en el manual de entretenimiento del vehículo (Renault 4 TL) así como en la tarjeta de inspección técnica de vehículos. El coeficiente aerodinámico se ha obtenido de la web "<http://tech-racingcars.wikidot.com>" la cual, tiene una tabla con los coeficientes de vehículos que han participado en eventos de carreras de vehículos, entre los cuales se encuentra el Renault 4 TL. El neumático instalado actualmente es el 135/80 R13, código dispuesto tal como indica la directiva 92/23/CEE del consejo de 31 de marzo de 1992 del Boletín Oficial del Estado (BOE), habiendo sido este homologado y cuyo radio se calcula mediante la fórmula:

$$R = \frac{0.135 * 0.8 * 2 + 13 * 0.0254}{2} = 0.27 \text{ m}$$

Además, es necesario conocer los siguientes parámetros:

- Aceleración de la gravedad: $g = 9.8$ m²/s
- Densidad del aire: $\rho = 1.25$ kg/m³
- Pendiente del recorrido: 0 % (Para ciclos NEDC y WLTC)
- Velocidad del viento: $V_{vie} = 0$ m/s (Para ciclos NEDC y WLTC)

Las ecuaciones que modelan el vehículo vienen dadas por las fuerzas que le afectan durante su conducción las cuales son:

- Fuerza de rozamiento $F_{rr} = C_r * m * g$. Donde C_r es el coeficiente de rozamiento cuyo valor depende de la velocidad del vehículo de la forma:

$$C_r = 0.01 * \left(1 + \frac{3.6}{100} * v_{veh} \right)$$

- Fuerza aerodinámica $F_{ad} = 0.5 * \rho * A * C_d * (V_{veh} \pm V_{vie})^2$. Siendo + cuando el viento es en dirección contraria y - cuando es en la misma dirección.
- Fuerza de ascensión $F_{as} = m * g * \text{sen} \alpha$ siendo α el ángulo de la carretera en grados (pendiente)
- Fuerza de aceleración lineal $F_{acl} = m * a$ calculándose la aceleración del vehículo como $a = dV_{veh}/dt$. En caso de frenado regenerativo se considera que la energía que se puede recuperar es del 40 %, como se indica en el libro [1] por lo que para aceleraciones negativas (frenado) $F_{acl} = m * a * 0.4$.
- Fuerza de aceleración angular. Para no tener que hacer un estudio exhaustivo de la mecánica del vehículo, puesto que es inviable en este estudio, se utilizara lo que especifica el libro [1], como en el caso de la F_{acl} , considerando que $F_{aca} = 0.05 * F_{acl}$.

Para realizar el estudio energético del modelo dinámico se utiliza el ciclo WLTC puesto que es el utilizado actualmente por los fabricantes como indica el BOE en el documento con referencia DOUE-L-2018-82096. Además, también se utilizará el ciclo NEDC, el cual era el utilizado anteriormente, así como los ciclos que realizaría el vehículo ensayado rutinariamente obtenidos vía GPS.

3. Estudio energético y dinámico

Para realizar el estudio energético mediante Matlab & Simulink, desarrollado por MathWorks, primero es necesario implementar los ciclos para los cuales se va a hacer el estudio.

En el caso del ciclo WLTC como se indica en el reglamento (UE) 2017/1151 de la comisión de 2 de junio de 2017 según la relación de Potencia/masa del vehículo se utilizará el ciclo WLTC que corresponda. La clase de ciclo viene dada por la siguiente regla:

- Para $P_{mr} \leq 22$ W/kg, clase 1
- Para $22 < P_{mr} \leq 34$ W/kg, clase 2
- Para $34 < P_{mr}$ W/kg, clase 3

Además, en la clase 3 se subdivide en 3a para vehículos con una velocidad máxima menor a 120 km/h y 3b para los que tengan una velocidad máxima de 120 km/h o mayor.

Para una aproximación inicial, en el caso del vehículo a estudiar la relación de potencia/masa es de:

$$P_{mr} = \frac{38 * 735.5}{1090} = 25.64 \text{ W/kg}$$

Por lo que le corresponde el ciclo WLTC clase 2 el cual se divide en cuatro fases: baja, media, alta y extra alta. Las fases son descritas en el reglamento de forma gráfica y mediante tablas las cuales son pasadas a Excel para formar el ciclo completo, y a su vez el ciclo completo formado con Excel a Simulink mediante el bloque "Signal Builder".

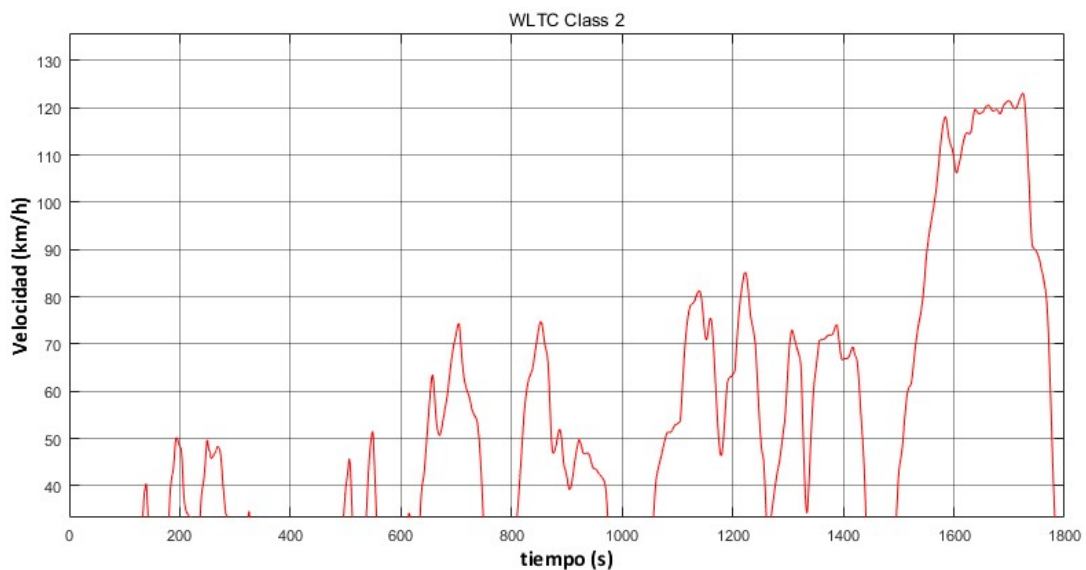


Figura 1 ciclo completo WLTC clase 2 en Simulink.

El ciclo NEDC, sustituido por el ciclo WLTC, entro en vigor mediante la directiva 98/69/EC de la Unión Europea el 13 de octubre de 1998. Aunque ya está derogada muchos de los fabricantes de los vehículos siguen teniendo las fichas técnicas de sus modelos con este ciclo por lo que es de interés para este estudio tenerlo en cuenta.

EL ciclo NEDC está formado por cuatro ciclos urbanos ECE-15 y un ciclo extraurbano EUDC. Para formar el ciclo completo en Matlab se ha utilizado el bloque "Repeating Sequence" para formar los ciclos por separado y el bloque "Switch" para que realice el cambio del EDC15 cuando se haya repetido 4 veces al EUDC. A continuación, se muestra el subsistema que se ha utilizado para formar el ciclo, así como la gráfica del ciclo que se forma en Simulink.

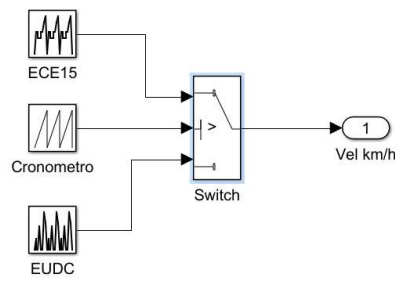


Figura 2 Bloques para formar el ciclo NEDC completo en Matlab.

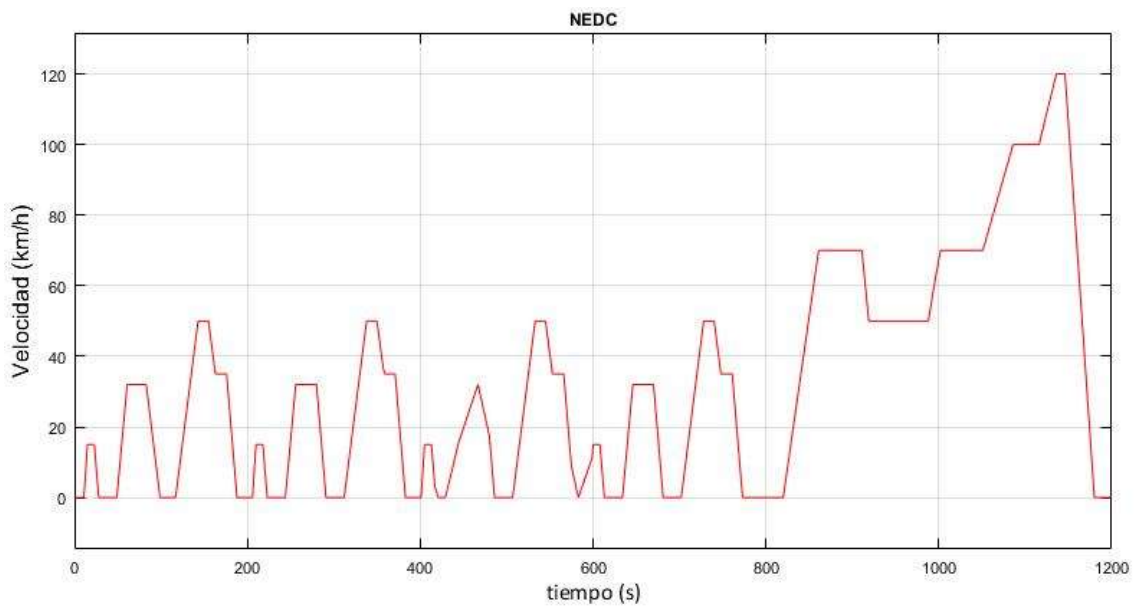


Figura 3 Ciclo completo NEDC en Simulink.

En cuanto a los ciclos que el vehículo podría realizar se ha optado por utilizar los más representativos. Son el de mayor recorrido, uno de recorrido intermedio y un ciclo corto que se realiza los días laborales. Sus datos se han obtenido mediante un GPS de la marca Garmin los cuales pueden ser procesados mediante el programa "Garmin BaseCamp". Un ejemplo de los datos que se obtienen del recorrido corto mostrado a continuación.

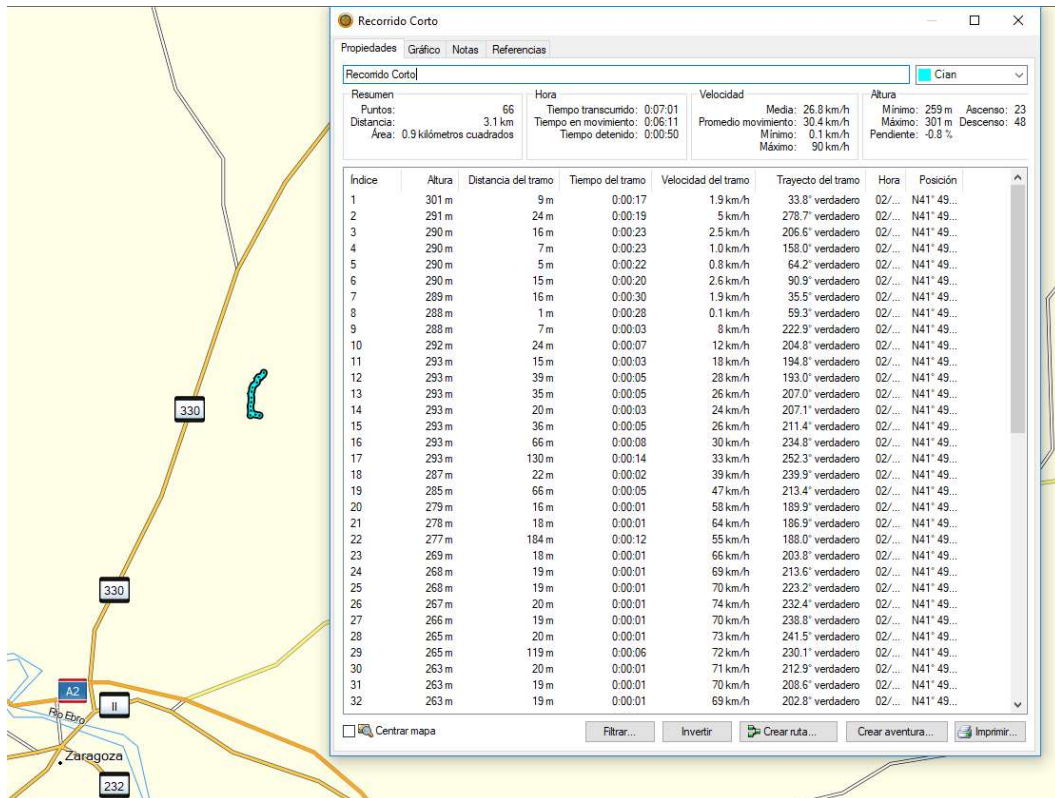


Figura 4 datos de los primeros 32 tramos del recorrido corto en el programa "Garmin BaseCamp".

Para poder utilizar los datos en Simulink en necesario pasar los datos a una escala continua de tiempo a partir de la de por tramos dada por el programa. Además, hay que realizar el cálculo de la pendiente a partir de la altura y la distancia del tramo.

Para realizar el cálculo de la pendiente, para evitar posibles márgenes de error en las alturas en los tramos más cortos, se ha utilizado la opción de filtrado que realiza el programa que une los tramos más cortos en únicos tramos para una distancia dada. En el caso de estos estudios el filtrado de la pendiente se ha hecho de forma que los tramos más pequeños sean de aproximadamente 200 metros.

La pendiente se ha calculado para los tramos, tomando como primera referencia el punto de salida del ciclo como origen y a partir de este comparando la altura de un tramo con el anterior. De esta forma la ecuación para calcular la pendiente de cada tramo en grados queda de la forma

$$pendiente = \arctangente \frac{h1 - h2}{d}$$

Siendo:

- h1: altura del tramo
- h2: altura del tramo anterior
- d: distancia del tramo

También se ha calculo porcentualmente para poder compararlo con el dado por el programa dl GPS y así saber si se ha hecho el cálculo de manera correcta para lo que se ha utilizado la ecuación.

$$pendiente = \frac{(h1 - h2) * 100}{d}$$

Para pasar de los tiempos de los tramos a una escala continua de tiempo que vaya del instante 0 al final del ciclo completo, se ha calculado primero el tiempo que se acumula tramo a tramo, con el comando "COINCIDIR()" se ha comparado la matriz del tiempo acumulado con la escala de tiempo deseada para así,

con el comando "INDICE()" poder pasar a la escala deseada comparando las columnas que tienen la velocidad y la pendiente por tramos con la generada con el comando "COINCIDIR()".

El viento es otro de los parámetros que afectan al vehículo, para tenerlo en cuenta se han tomado los datos proporcionados por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Las estaciones Zaragoza/aeropuerto con indicativo 9434, Calamocha con indicativo 9381 y Teruel con indicativo 8368U son las más cercanas a los ciclos.

En concreto para el ciclo intermedio y corto se utilizará la velocidad media más alta del año 2018 proporcionada por la estación de Zaragoza. Siendo esta de 22 km/h. Para el ciclo largo puesto que la velocidad proporcionada por la estación de Calamocha es de 14 km/h y la de Teruel de 12 km/h, ambas siendo la velocidad media más alta del año 2018, y el ciclo pasa cerca de ambas estaciones se ha optado por considerar que la velocidad del viento para todo el ciclo sea de 14 km/h. La simulación se realizará en la situación más desfavorable, es decir con el viento en contra del vehículo.

El ciclo largo consiste en un tramo inicial que se corresponde con la salida del vehículo del pueblo San Mateo de Gállego en la provincia de Zaragoza hasta la autovía A23, un tramo principal que ocupa la mayor parte del ciclo en el cual el vehículo circula por la autovía A23 y un tramo final en el que se sale de la autovía y se entra en el pueblo Rubielos de Mora en la provincia de Teruel.

El ciclo intermedio corresponde con la circulación del vehículo desde el Pueblo de Híjar en la provincia de Teruel hasta la entrada de la autopista ARA-A1 circulando por la carretera nacional N-232, la entrada del vehículo en la Autovía AP-2 desde la autopista ARA-A1 y la circulación desde la autovía AP-2 hasta el casco antiguo de Zaragoza pasando por las autovías A2 y Z40.

El ciclo corto está compuesto por la circulación del vehículo desde el pueblo San Mateo de Gállego hasta el Polígono Industrial Río Gállego I, un tiempo de estacionamiento y el regreso del vehículo desde el polígono hasta el pueblo.

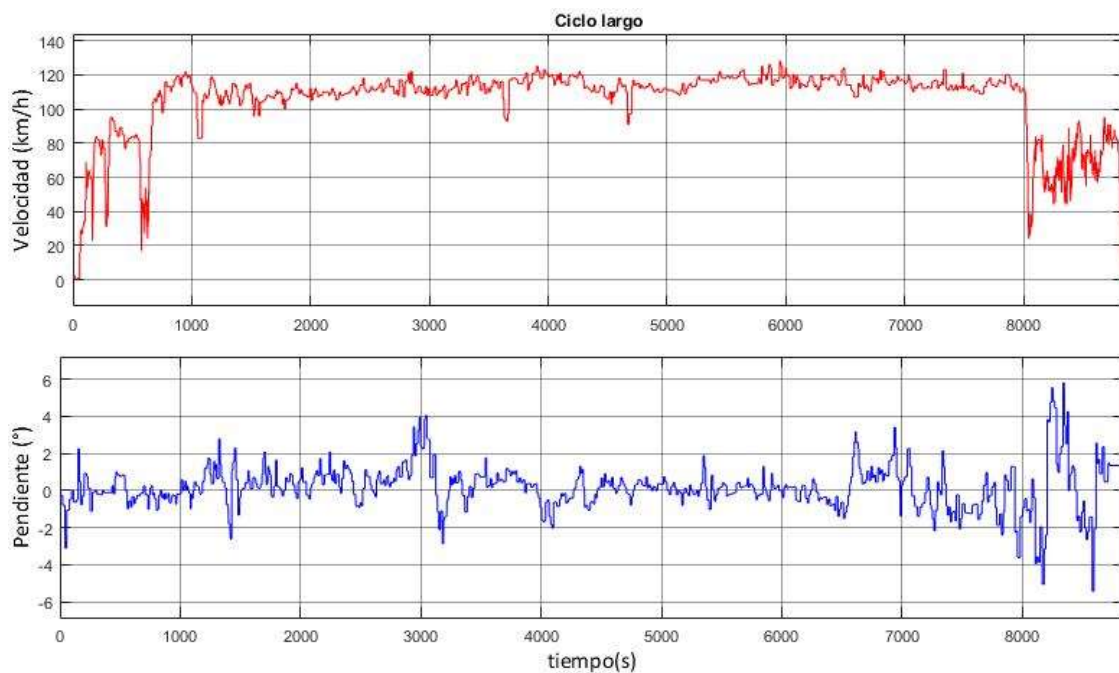


Figura 5 perfiles de velocidad y pendiente del ciclo largo en Simulink.

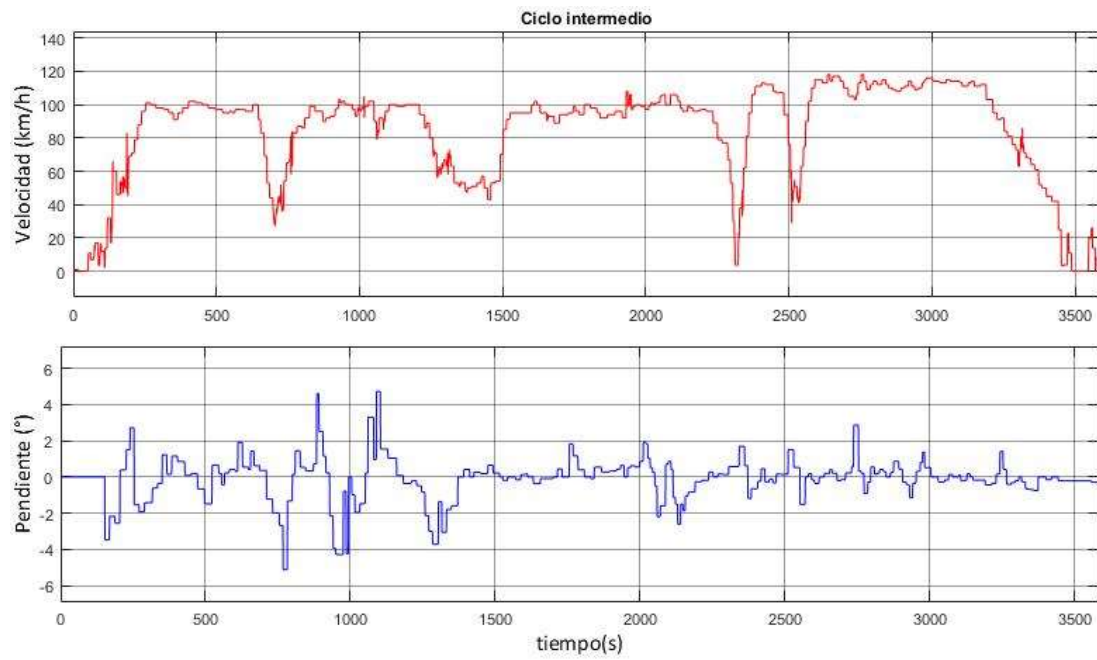


Figura 6 perfiles de velocidad y pendiente del ciclo intermedio en Simulink.

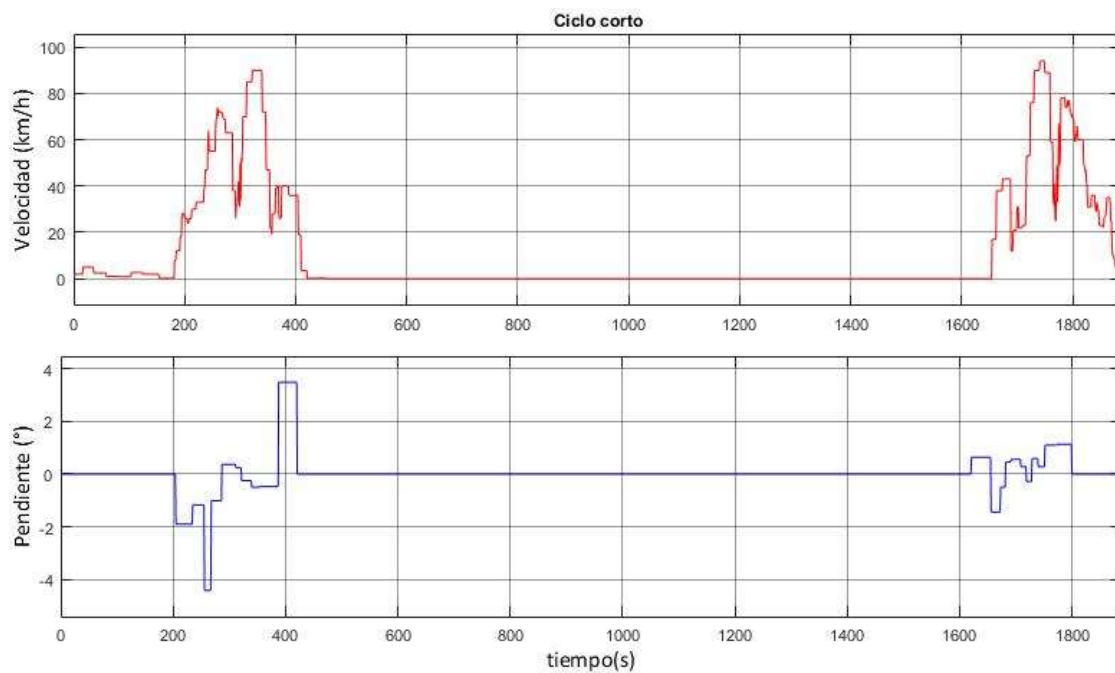


Figura 7 perfiles de velocidad y pendiente del ciclo Corto en Simulink.

Los perfiles de pendiente y velocidad son construidos mediante el bloque "Signal Builder". La velocidad del viento es introducida mediante una constante. El modelo físico del vehículo es construido mediante el bloque "MATLAB function" con el cual se puede generar un bloque de Simulink que ejecuta una función es un "Script" de MATLAB. Los datos del vehículo son introducidos mediante una máscara la cual inicializa los variables cuando se ejecuta la simulación.

El modelo de Simulink está compuesto por los ciclos, así como con unos interruptores para la selección de estos y de un subsistema con el modelo físico. Con él, se calcula la fuerza total que afectaría al vehículo además de la potencia, par y energía, parámetros necesarios para la selección del motor y de la batería. Los parámetros son medidos mediante los bloques "Scope" y "Display".

El subsistema tiene como entradas los parámetros que más se varían entre simulaciones. Dentro del subsistema, las entradas del bloque “*Matlab function*” y que no vienen del sistema principal son las constantes que se mantienen iguales para todos los ciclos y que son definidas mediante la máscara Datos_vehiculo.

En la función es donde se definen las ecuaciones indicadas en la sección Modelo dinámico del vehículo de este estudio mediante una estructura condicional if-elseif-else para diferenciar los diferentes escenarios posibles los cuales son: la recuperación de energía en el frenado, la dirección del viento y la conducción con pendiente. El modelo, la función y la máscara son mostrados en el anexo III.1.

Para la selección del motor, como recomiendan los fabricantes de motores para aplicaciones en las que varíe de manera continua el punto de operación, se ha hecho mediante el cálculo de la potencia que se necesitaría a partir del par efectivo. La ecuación del par efectivo dada por los fabricantes provienen de calcular el valor eficaz del perfil de par del ciclo a calcular. Siendo el valor eficaz.

$M_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^t M^2(t) dt}$, si se considera que el par se mantiene constante para cada tramo de aceleración, frenado o velocidad constante entonces $M_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \left(\int_0^{t_1} M_1^2 dt + \int_{t_1}^{t_2} M_2^2 dt + \dots + \int_{t_{n-1}}^{t_n} M_n^2 dt \right)}$ de lo que resolviendo la integral y siendo T el tiempo total del ciclo $T = t_1+t_2+\dots+t_{n-1}+t_n$ la ecuación se queda de la siguiente forma:

$$M_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} (M_1^2 * (t_1 - 0) + M_2^2 * (t_2 - t_1) + \dots + M_n^2 * (t_n - t_{n-1}))}$$

Que si lo comparamos con la ecuación dada por los fabricantes mostrada en la siguiente figura

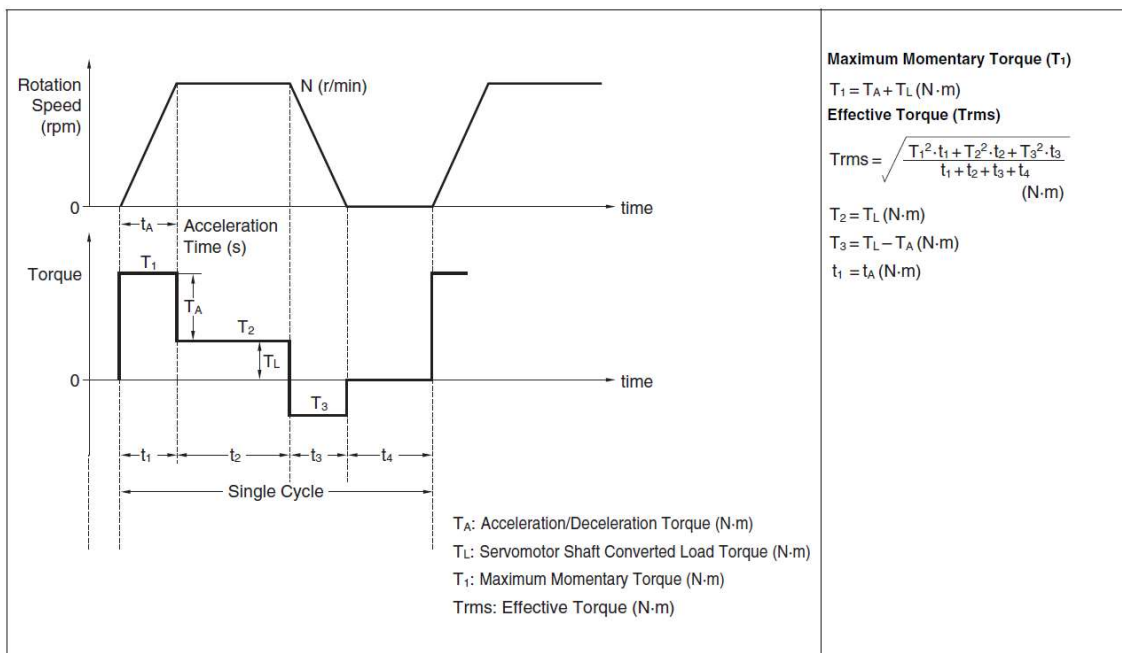


Figura 8 Cálculo del par eficaz para un ciclo según el fabricante Omron en el documento “*Servo Motor Selection Flow Chart*”.

se demuestra que la ecuación original es $M_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^t M^2(t) dt}$ por lo que para calcular el par efectivo se puede utilizar la herramienta dada por Simulink con la cual se calcula el valor eficaz de un ciclo mostrado en el bloque “*Scope*”. La potencia con la cual se selecciona el motor viene dada por el producto del par efectivo con la mayor velocidad del ciclo en rad/s.

Con el modelo del anexo III.1 se construyen la siguiente tabla con el par efectivo, la potencia necesaria para la selección del motor, la velocidad máxima, la energía total necesaria a almacenar para realizar el ciclo y la energía por kilómetro consumida para cada ciclo.

	CICLO NEDC	CICLO WLTC	CICLO CORTO	CICLO INTERMEDIO	CICLO LARGO
Velocidad maxima (rad/s)	122.06	125.21	95.61	120.02	130.19
Par efectivo (Nm)	135.70	147.00	200.00	303.70	321.30
Potencia Necesaria (kW)	16.56	18.41	19.12	36.45	41.83
Energía a almacenar para 1 ciclo (kWh)	1.42	3.46	1.14	21.02	72.72
Consumo por kilometro (kWh/km)	0.13	0.15	0.19	0.25	0.28

Tabla 2 Datos necesarios para selección de motor y batería.

En la tabla queda manifestado que, aunque el ciclo NEDC y WLTC sirven para poder hacer comparaciones entre diferentes vehículos y tener unos datos estandarizados no sirven para la selección de los componentes del vehículo puesto que estos son mucho menores a los de los ciclos reales.

4. Selección del motor eléctrico.

Los datos de partida para la selección del motor vienen dados por la sección anterior. Se necesita un motor con una potencia mayor de 42 kW y que pueda mantener al vehículo a una velocidad de 130 km/h. Para que el motor pueda aportar el par necesario a las ruedas se utiliza una reductora. Además, es necesario que el motor tenga una buena eficiencia ante cambios de par y velocidad.

Los motores que se utilizan principalmente de manera comercial para el vehículo eléctrico son los motores de inducción (IM), utilizado por fabricantes como Tesla, y los motores síncronos de imanes permanentes (PMSM), usado por Nissan, BMW y Kia entre otros. Además, está en funcionamiento el proyecto MotorBrain en el cual se quiere desarrollar el motor de reluctancia (RM) como una opción diferente a los nombrados. El motor sin escobillas de imanes permanentes (PMBLDC), usado sobre todo en vehículos híbridos, se está desarrollando su posible uso en vehículos eléctricos y fabricantes como Honda los está instalando en algunos de sus prototipos y preseries.

Actualmente en el mercado no hay motores de reluctancia que pueda suplir las condiciones de los ciclos por un precio aceptable por lo que quedan descartados. Además, tienen unas desventajas respecto a los otros tipos de motores como son la necesidad de un sistema de refrigeración más complejo al generarse calor en el rotor y en el estator, generación muy elevada de ruido y factores de potencia bajos que hacen que no sean adecuados hasta que se consigan solventar.

El “*Institute of Electrical and Electronics Engineers*” (IEEE) realizó una comparativa entre los modelos planteados en el artículo [2]. En él se calcula la eficiencia de los diferentes tipos de motores para unos mismos puntos de funcionamiento. Como se muestra en la siguiente figura los PMSM tienen mayores eficiencias en rangos de par y velocidad medios y los IM tienen su máxima eficiencia a pares bajos y velocidades altas. Las eficiencias más altas de los PMSM y los IM son similares y algo mayores a la de los RM. Las eficiencias de los PMSM son mayores para el PMSM de más ranuras.

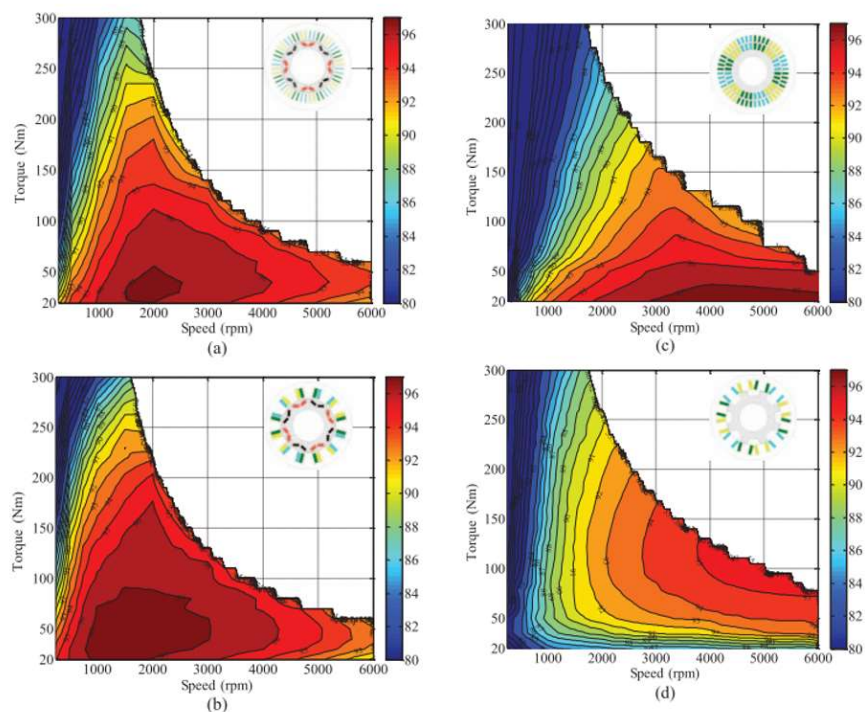


Figura 9 Comparación de mapa de eficiencias entre a) 48/8 PMSM b) 12/8 PMSM c) 48/36 IM d) 12/8 RM artículo [2].

La diferencia entre un PMSM y un PMBLDC es que, en el PMSM se utiliza una jaula de ardilla en el rotor y en el PMBLDC se utiliza un control de posición y velocidad mediante sensores Hall, además el

devanado estatórico de los PMSM es idéntico al de los motores asíncronos mientras que el de los PMLBDC está formado por bobinas concentradas arrolladas.



FIGURA 10 Estator de PMLBDC de la compañía Lymotor.

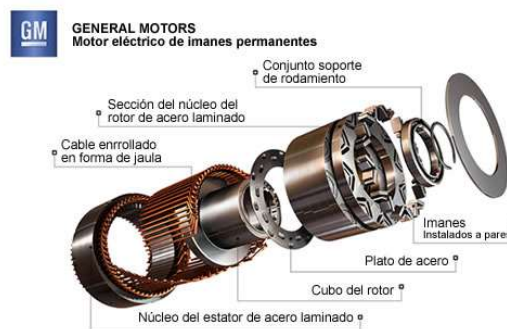


Figura 11 PMSM utilizado por el coche Chevrolet Volt.

Debido a la simplicidad de su control, así como a su eficiencia en sus diferentes puntos de trabajo y su densidad de potencia, el tipo de motor con el que se considera que se realizaría la conversión es el PMLBDC.

El motor seleccionado que cumple las condiciones de diseño plantadas es el Zytec IDT 120-55 sistema formado por el motor, un inversor trifásico con el cual se alimenta el motor y el circuito de refrigeración. Los datos dados por el fabricante son los siguientes:

Technical Data		
Combined Motor/Inverter Unit	Motor	Inverter
Weight	Type	Type
62kg (dry)	Permanent Magnet	IGBT 3-phase bridge
Power (max @ 278V)	Brushless DC	Supply voltage
55kW	Torque (max)	250V – 400V
Coolant	Max operating speed	Vehicle communications
Water/Glycol mix	12,000rpm	Dual CAN
Operating ambient temperature		Vehicle auxiliary system supply
-20°C to +65°C (storage -40°C)		14V at 70A (max constant current)
Environmental rating		
IP 6K6K		

Figura 12 Datos técnicos dados por el fabricante (Zytec).

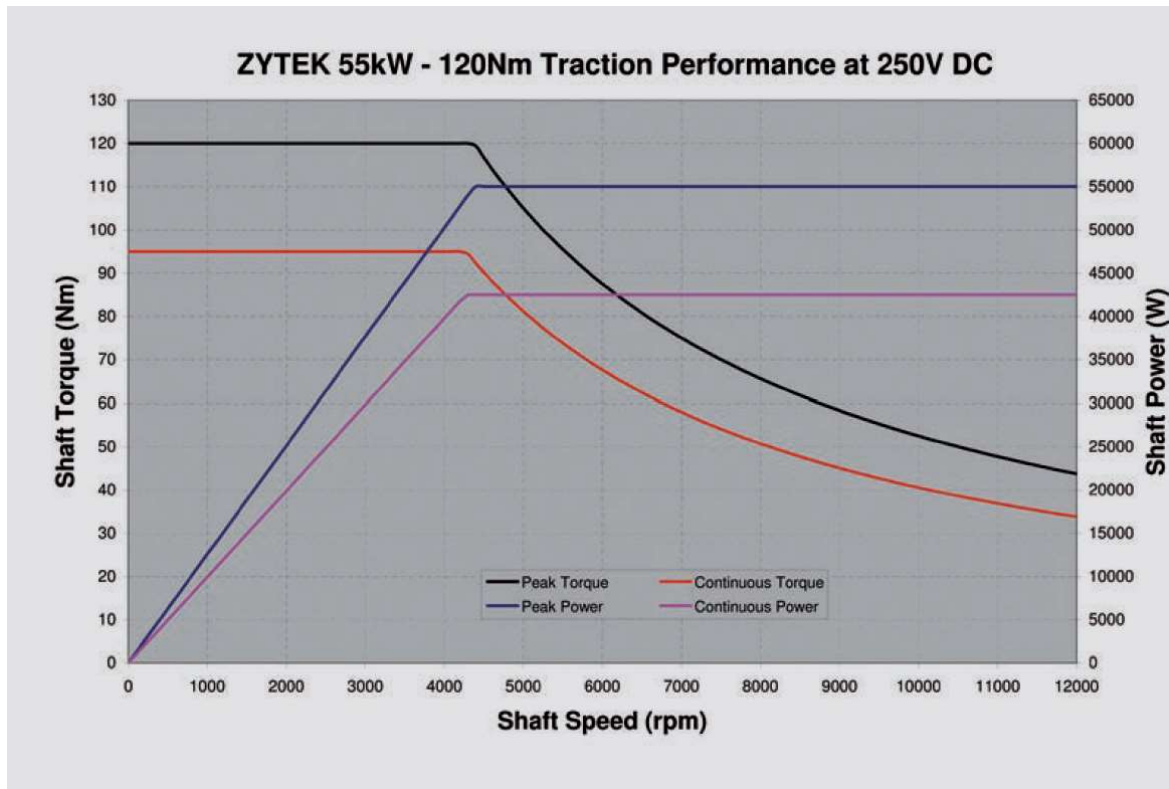


Figura 13 Curvas de par, velocidad y potencia a 250 V dadas por el fabricante (Zytec).

Las dimensiones del motor son:

- Altura 361 mm
- Longitud 433 mm
- Ancho 366 mm
- Diámetro exterior carcasa del estator 241.5 mm

El espacio reservado para él motor es superior a las dimensiones del modelo seleccionado por lo que en este sentido es adecuado para la conversión, sin embargo, para que pueda suplir el par que aparece en los ciclos es necesario instalar una reductora.

Para la potencia máxima del motor de 55 kW y con una velocidad de 130 km/h el par en rueda es de:

$$M_{rueda} = \frac{P}{\omega} = \frac{P}{v_{veh}/R} = \frac{55000}{\left(\frac{130}{3.6}\right)/0.27} = 411.2 \text{ Nm}$$

Por lo que la relación de reducción de la reductora tendrá que ser de $G = M_{rueda}/M_{max} = 411.2/120 = 3.42$. La velocidad del motor con esta G será de:

$$n_{rueda} = \omega * \frac{60}{2\pi} = \left(\frac{130}{3.6 * 0.27}\right) * \frac{60}{2\pi} = 1277.17 \text{ rpm}$$

$$n_{motor} = G * n_{rueda} = 3.42 * 1277.17 = 4367.92 \text{ rpm}$$

Por lo que con esta reductora se entraría en un punto de funcionamiento válido para la velocidad máxima impuesta por los ciclos.

Otra opción es instalar la reductora hecha para este motor específico la cual tiene una relación de reducción de $G = 8.75$. para esta reductora el par en el motor es de $M_{rueda}/G=411.2/8.75= 47 \text{ Nm}$ y la velocidad de $n_{motor} = G * n_{rueda} = 8.75 * 1277.17 = 11175 \text{ rpm}$ valores que también se

corresponden con un punto de funcionamiento valido como se refleja en la gráfica de Par, velocidad y potencia, aunque no ideal puesto que no trabaja en la zona de par constante. Puesto que la reductora está diseñada para el motor ZYTEK IDT 120-55, es la que se selecciona. El motor tiene un precio de 900 \$ y la reductora de otros 900 \$. La reductora tiene un peso de 34 kg. La solución para que pudiera trabajar en la zona de par constante consistiría en el diseño y fabricación de una reductora con una relación de reducción de 3.42, como se había planteado originalmente.

4.1 Implementación de un PMBLDC en Simulink.

El principio de funcionamiento de un motor PMBLDC es orientar los imanes permanentes alojados en el rotor con un campo electromagnético rotatorio que se forma al ir cambiando las fases que se alimentan del devanado estátorico.

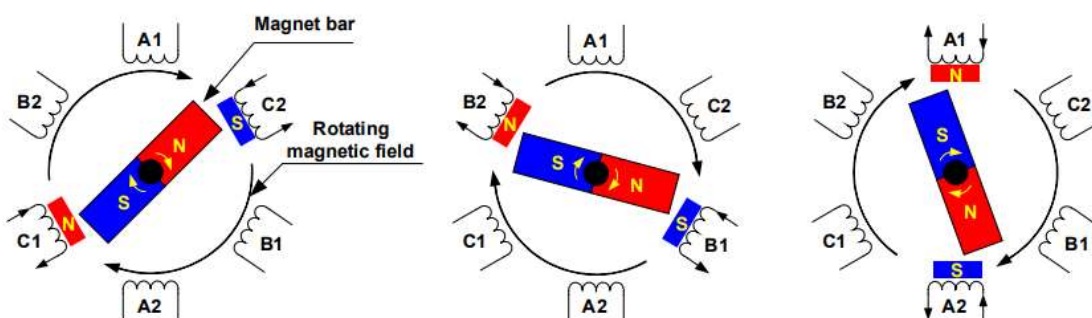


Figura 14 Rotación del motor [4].

En el caso de PMBLDC con un devanado estátorico conectado en estrella, mediante los sensores Hall se comunica mediante un decodificador cuales son las puertas del inversor que tienen que ser activadas para que el motor gire en el sentido deseado. Para producir el giro de los imanes permanentes el motor es alimentado por dos de las tres fases de la salida del inversor. De esta forma a pesar de que el PMBLDC está construido de forma que hay tres fases en el estator. Por este, solo circula la corriente por dos de las fases formando un circuito equivalente similar al que tendría un motor de corriente continua.

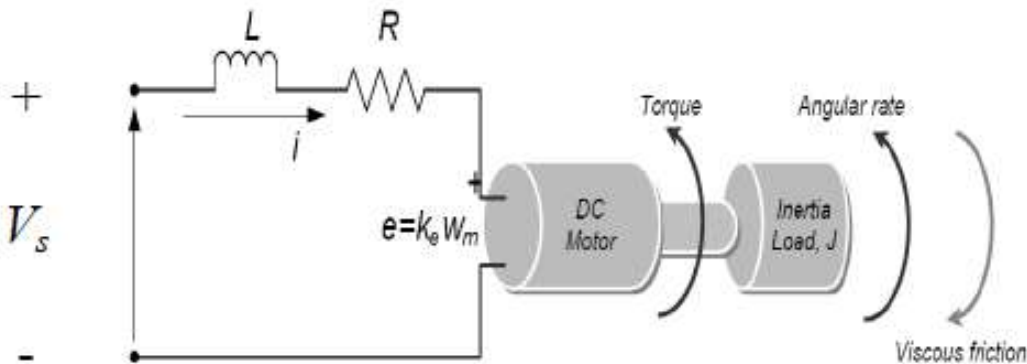


Figura 15 Circuito equivalente de PMBLDC cuando está conectado entre dos fases [3].

En el circuito equivalente, R es la resistencia interna y L la inductancia interna, ambas de fase a fase. A la hora de realizar el modelo se considera que el motor está equilibrado por lo que $R_a = R_b = R_c = R/2$ y $L_a = L_b = L_c = L/2$.

4.1.1 Control de los sensores Hall.

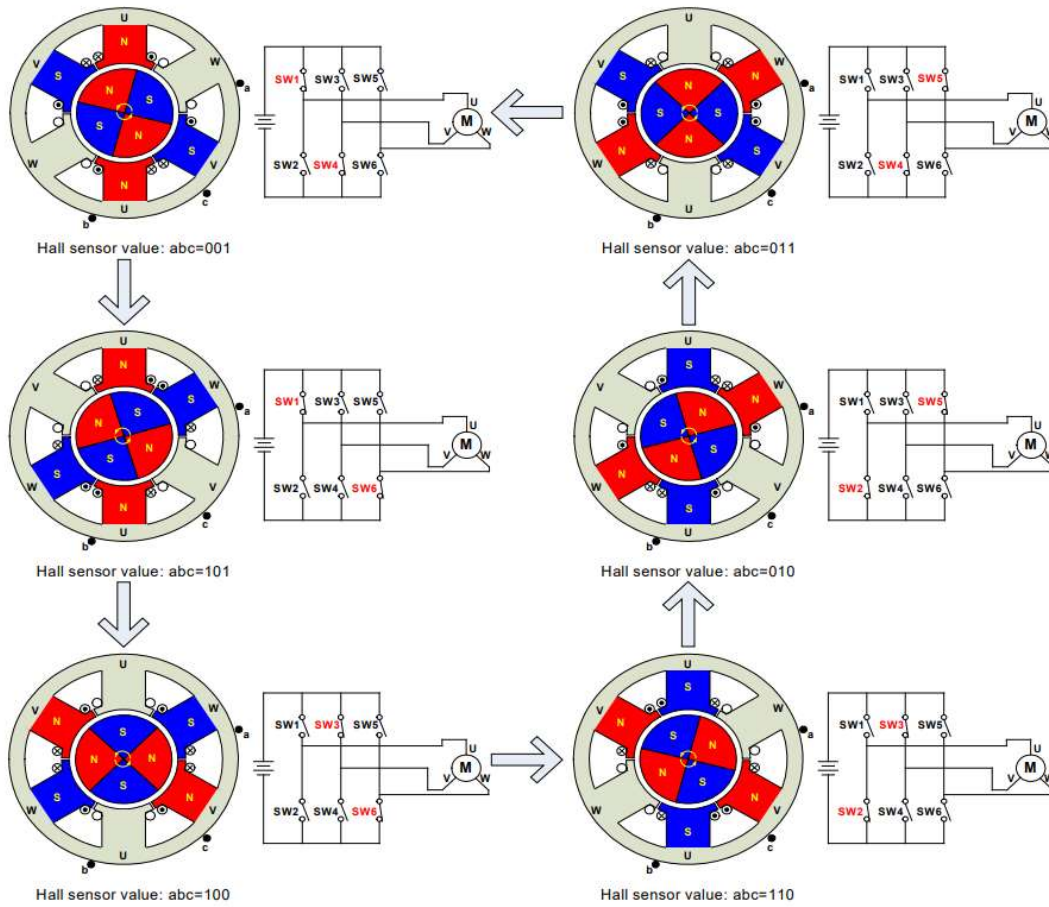


Figura 16 Secuencia de conmutación de un PMSM [4].

Los sensores utilizan una lógica binaria en la cual se ponen a 1 cuando detectan un norte en el rotor y un 0 cuando detectan un sur. De esta forma, se construye una tabla con todos los estados posibles en los que pueden estar los sensores. Hay 8 combinaciones de estados para 3 sensores, debido a los grados geométricos que hay entre los sensores nunca podrán estar los 3 en el mismo estado, hay 6 combinaciones. Para cada combinación se define cuáles son los interruptores que han de ser activados para alimentar el motor con las 2 fases que permiten el giro de este.

El motor seleccionado viene con un inversor trifásico formado por IGBTs y diodos. Para implementar el inversor en Matlab se utiliza el bloque "Inverter" el cual tiene la siguiente denominación para el caso de "IGBT-Diode bridge".

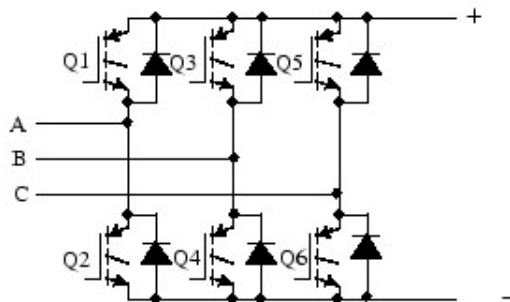


Figura 17 esquema inversor de puente trifásico IGBT-diodos del bloque "Inverter (Three-Phase)" de Simulink.

Además, para hacer la decodificación en el caso del PMBLDC que se puede implementar en Simulink los sensores Hall siguen la siguiente secuencia de la cual se definen cuáles son las puertas que hay que activar del inversor.

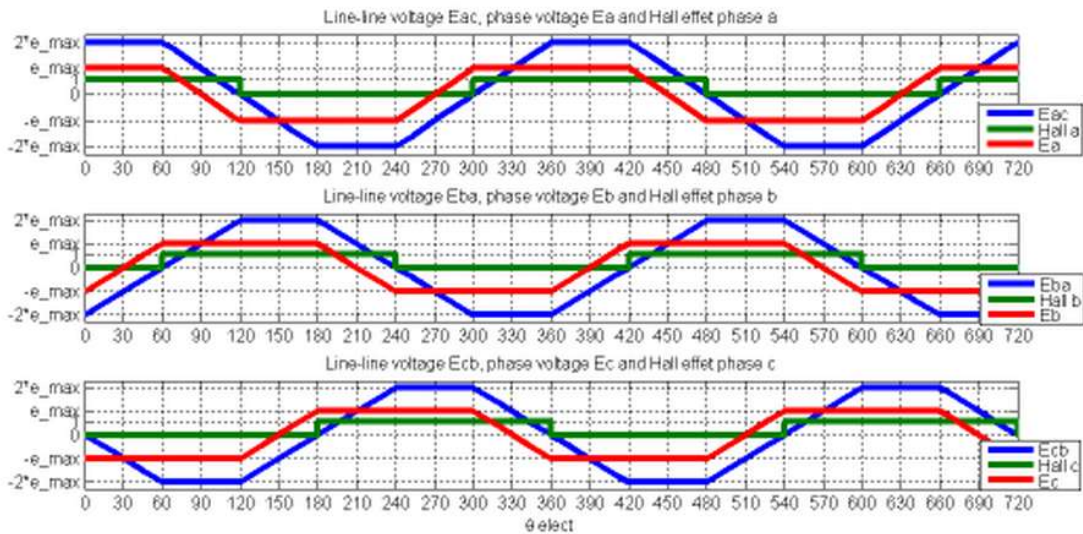


Figura 18 Fase de alimentación según los sensores hall activos del bloque “Permanent Magnet Synchronous Machine” de Simulink.

Sensores Hall [Ha Hb Hc]	Fase	Puertas del inversor a activar
1 0 0	V_{ac}	Q1, Q6
1 1 0	V_{bc}	Q3, Q6
0 1 0	V_{ba}	Q3, Q2
0 1 1	V_{ca}	Q5, Q2
0 0 1	V_{cb}	Q5, Q4
1 0 1	V_{ab}	Q1, Q4

Tabla 3 puertas del inversor trifásico a activar según los sensores hall activos.

Para realizar el giro en el sentido contrario, a diferencia del resto de los motores eléctricos trifásicos, cambiar una fase de la alimentación con otra no es adecuado puesto que impediría el correcto funcionamiento de los sensores Hall. Para poder cambiar el sentido del giro, y por tanto realizar la marcha atrás del vehículo es necesario invertir la secuencia de alimentación del motor, para ello se tiene que invertir el orden en el que se activan las puertas del inversor.

Sensores Hall [Ha Hb Hc]	Fase	Puertas del inversor a activar
1 0 0	V_{ca}	Q5, Q2
1 0 1	V_{ba}	Q3, Q2
0 0 1	V_{bc}	Q3, Q6
0 1 1	V_{ac}	Q1, Q6
0 1 0	V_{ab}	Q1, Q4
1 1 0	V_{cb}	Q5, Q4

Tabla 4 puertas del inversor trifásico a activar según los sensores hall activos para invertir el sentido de giro.

Para implementar la lógica de la tabla se utiliza el bloque “Matlab function” mediante una lógica if-elseif-else. Para seleccionar el sentido de giro se utiliza una lógica switch-case. La función se define en el Anexo III.3

4.1.2 Estimación de los parámetros que modelan el motor.

Para simular el funcionamiento del motor en Simulink se utiliza el bloque “*Permanent Magnet Synchronous Machine*”. Para que funcione como un PMSBLDC trifásico hay que configurarlo con 3 fases y con una fuerza contraelectromotriz (“*Back EMF*”) trapezoidal.

Como no se tienen todos los parámetros para modelizar el motor de una manera exacta se ha optado por utilizar los parámetros de un motor similar para aquellos que no se pueden calcular a partir de las características dadas por el fabricante. Una vez introducidos los parámetros se optimizan de una manera iterativa para que la simulación funcionara en uno de los puntos conocidos de trabajo. El punto de trabajo concreto que tiene que dar la simulación es, para la tensión de alimentación máxima del inversor, 400 V DC y un par de 47 Nm (Par máximo con una reductora de 8.75) el motor tiene que tener una velocidad de 11175 rpm y una potencia de 55 kW.

Los parámetros que utiliza Simulink para definir los motores PMSBLDC son los mostrados en la siguiente figura:

Figura 19 Herramienta de cálculo a partir de las especificaciones de los fabricantes del bloque “*Permanent Magnet Synchronous Machine*” de Simulink.

Para el cálculo de la resistencia fase-fase se ha utilizado la constante eléctrica de un motor de similares características (GKN Axial Flux AF125) puesto que no se podía obtener de los datos del motor a simular.

Como se define en el artículo [3], así como en el libro [5], en estado estacionario la tensión viene dada por $V_s = R \cdot i + e$. pudiendo definir $e = K_e \cdot \omega_m$ y siendo:

- V_s = tensión DC que alimenta la fase (V)
- i = corriente que circula por la fase (A)
- e = fuerza contraelectromotriz (V)
- K_e = constante eléctrica (V*s/rad)
- ω_m = velocidad angular máxima (rad/s)

La resistencia fase-fase del motor R_{ph-ph} , con una $K_e = 0.33$ (obtenida de las especificaciones del motor AF125) es de:

$$R_{ph-ph} = \left(\frac{400 - 0.33 * 11175 * \frac{2\pi}{60}}{55000/400} \right) = 0.1005 \Omega$$

La constante de par se calcula como la relación entre el para electromecánico y la intensidad que circula por la fase. Para una potencia de 55kW y un par de 47 Nm la constante de par se calcula como:

$$Kt = \left(\frac{47}{55000/400} \right) = 0.3418$$

A partir del artículo [6] se demuestra que una aproximación de la inercia en el lado del motor puede ser calculada de la siguiente forma:

$$J = \left(\frac{m * R^2}{\eta * G^2} \right) = \left(\frac{1090 * 0.27^2}{1 * 8.75^2} \right) = 1.037 \text{ kg} * \text{m}^2$$

Donde m es la masa total del vehículo, R el radio de la rueda, G la relación de la reductora y η el rendimiento de la reductora. Se ha tomado el rendimiento de la reductora como 1 puesto que no se tiene este dato en específico.

La fricción viscosa, el número de pares de polos y la inductancia de fase-fase se utilizan en principio los predefinidos por la herramienta de cálculo y a partir de estos valores se reduce la inductancia hasta que el motor funcione en el punto de trabajo deseado.

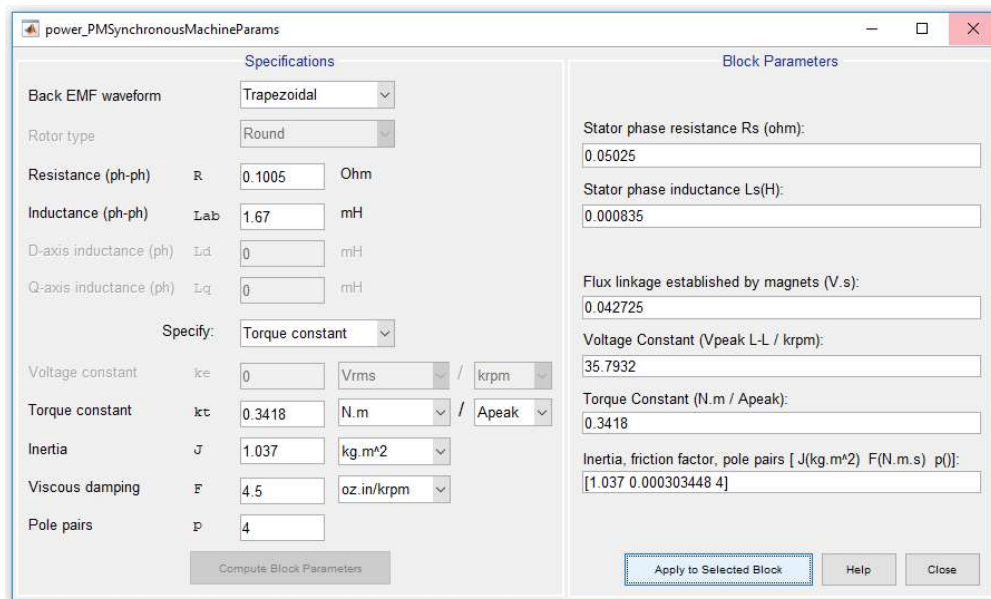


Figura 20 Parámetros iniciales para definir el bloque "Permanent Magnet Synchronous Machine" de Simulink.

Con estos valores la velocidad que tiene con un par de 47 Nm y una tensión de alimentación de 400 V es muy inferior a la deseada. Para llegar a esa velocidad los pasos que se siguen son los siguientes:

1. Reducir la inductancia hasta que la potencia sea cercana a la que debería tener y la velocidad ya no sea muy afectada por su reducción.
2. Reducir la constante de par hasta que la velocidad sea lo más cercana posible a la velocidad deseada.
3. Volver a modificar la inductancia para terminar de aproximarse al punto de trabajo correcto.

La razón principal por la que ha de reducirse la constante de par, aunque haya sido calculada con los parámetros del motor, es debido a que como no se tienen valores de rendimiento, el valor con el cual se había calculado la intensidad era con la potencia que es capaz de ceder el motor. Cuando en realidad, este

parámetro ha de calcularse con la suministrada. Por lo que la constante de par tenía que ser inferior a la calculada originalmente.

Los parámetros finales del motor son los mostrados a continuación.

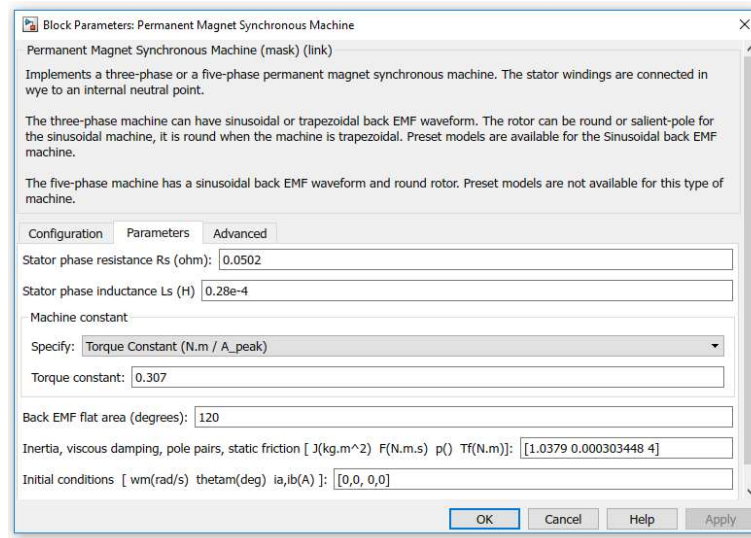


Figura 21 Parámetros finales para definir el bloque “Permanent Magnet Synchronous Machine” de Simulink.

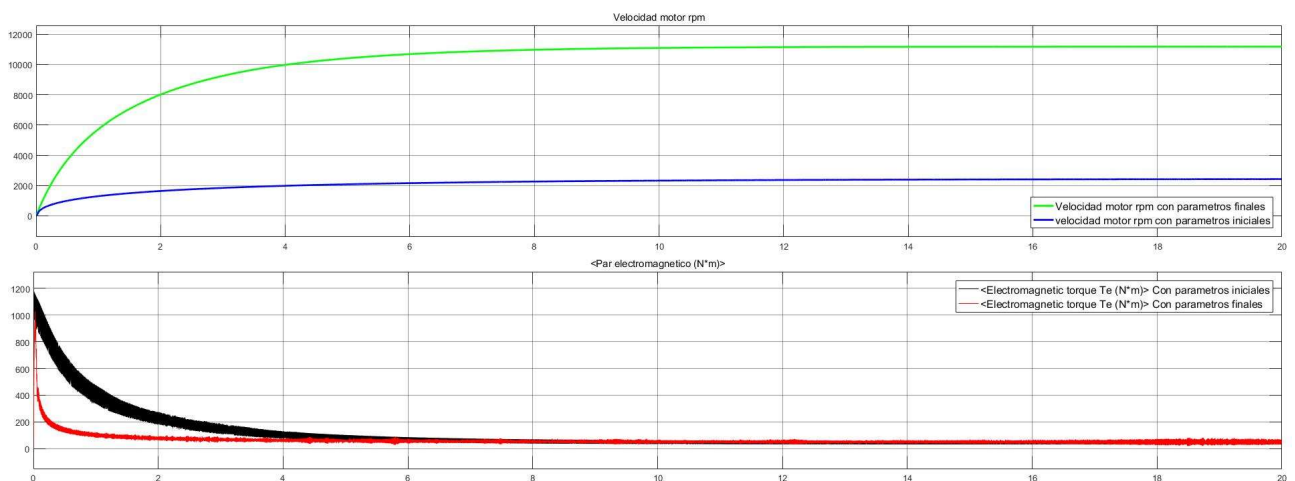


Figura 22 comparativa de la respuesta del motor de los parámetros iniciales con los finales en Simulink.

En la figura anterior se ve la respuesta del motor con una entrada de 47 Nm de par y alimentado mediante 400 V DC. Con los parámetros finales, da la respuesta que debería dar el motor real a esta entrada. Es decir, una velocidad de 11175 rpm en el motor que coincide con 130 km/h en el vehículo tras pasar la reductora, cediendo una potencia de 55 kW.

4.1.3 Control de velocidad.

El control de velocidad se realiza variando la tensión de alimentación del motor mediante un convertidor DC/DC para modificar el valor de la tensión dada por la batería. Para controlar la lógica de conmutación del convertidor se utilizan técnicas de modulación por anchura de pulso (PWM). La técnica PWM utilizada consiste en la comparación de una onda triangular con una señal de referencia llamada “Duty”. Cuando el “Duty” es superior a la onda triangular el valor de salida es 1 de tal forma que al modificarlo cambia el periodo en el que la señal de salida está a 1.

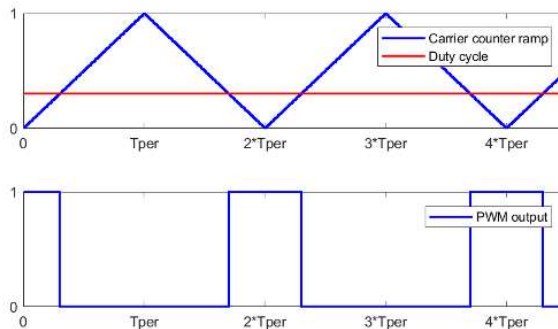


Figura 23 PWM "up-down-counter" de la documentación de Matlab del "PWM Generator".

El cálculo del "Duty" se hace con un controlador PID el cual lo calcula a partir del error (e) comparando la referencia de velocidad con la velocidad de salida, es decir la dada por el motor. El PID se rige por la fórmula:

$$Duty = k_p * e + k_i * \int e dt + k_d * \frac{de}{dt}$$

Que al pasarlo al dominio de Laplace se transforma de la siguiente manera:

$$Duty = e * (k_p + k_i * \frac{1}{s} + k_d * s)$$

En Simulink para poder implementar la operación $k_d * s$, la cual considera una función de transferencia inapropiada puesto que no soporta una derivada ideal sin filtrar, implementa un coeficiente de filtro quedando la ecuación de la siguiente forma:

$$Duty = e * \left(k_p + k_i * \frac{1}{s} + k_d * \frac{N}{1 + N * \frac{1}{s}} \right)$$

Donde con un coeficiente N lo suficientemente grande la ecuación se aproxima a la original. El coeficiente utilizado es el predeterminado N = 100. Si no se utilizara este coeficiente, el controlador sería demasiado sensible al ruido que podría provenir de los sensores y otros componentes del modelo.

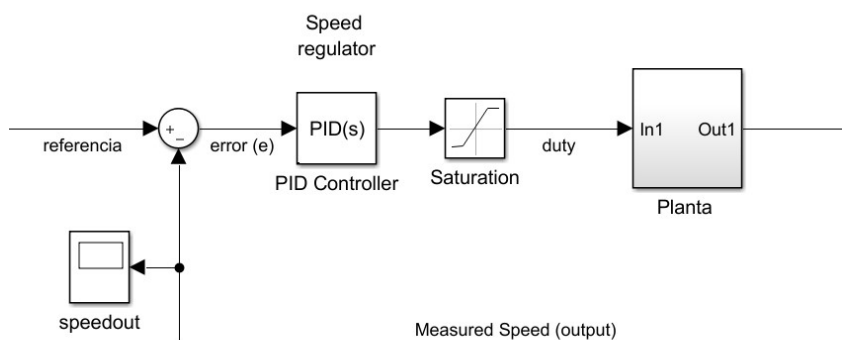


Figura 24 Diagrama de bloques del sistema regulado Simulink.

Para el cálculo del PID es necesario conocer la función de transferencia G(s) de la planta la cual está formada por el PMLDC y la batería. El modelo matemático del motor viene dado por las ecuaciones que lo definen las cuales son:

- Usando la ley de Kirchoff en el circuito equivalente $V_s = R * i + L * \frac{di}{dt} + e$ donde “e” es la fuerza contraelectromotriz.
- Usando la segunda ley de Newton $J * \frac{d\omega}{dt} = \sum M_i$ la cual al desarrollarla se queda como $M_e = K_f * \omega + J * \frac{d\omega}{dt} + M_L$ siendo
 - M_e = par electromecánico
 - K_f = constante de fricción
 - ω = velocidad angular
 - J = inercia de la carga
 - M_L = Par mecánico

Definiendo la constante eléctrica como $K_e = e/\omega$ y la constante mecánica como $M_e = K_t * M_e$ si se siguen las operaciones como se explican en el artículo [3], la función de transferencia que definiría al motor sería:

$$G(S) = \frac{1}{\tau_m \tau_e s^2 + \tau_m s + 1} \frac{1}{K_e}$$

Figura 25 Función de transferencia de un PMBLDC con $G(S) = V_i/\omega$ [3].

Al tener en cuenta la batería, en el diagrama de bloques actúa como un amplificador del “Duty” quedando la función de transferencia de la planta como:

$$G(s) = \frac{V_{dc} * \frac{1}{K_e}}{\tau_m * \tau_e * s^2 + \tau_m * s + 1}$$

Donde:

- Constante de tiempo mecánica = $\tau_m = \frac{J * 3 * R}{K_e * K_t}$
- Constante de tiempo eléctrica = $\tau_e = \frac{L}{3 * R}$
- Resistencia de fase a fase = R
- Inductancia de fase a fase = L

El cálculo de la función de transferencia se realiza mediante la implementación en Simulink de una máscara que lea los parámetros del modelo y a su vez, haga los cálculos necesarios mediante un “Script” de Matlab llamado “PIDcalculation” definido en el anexo III.3.

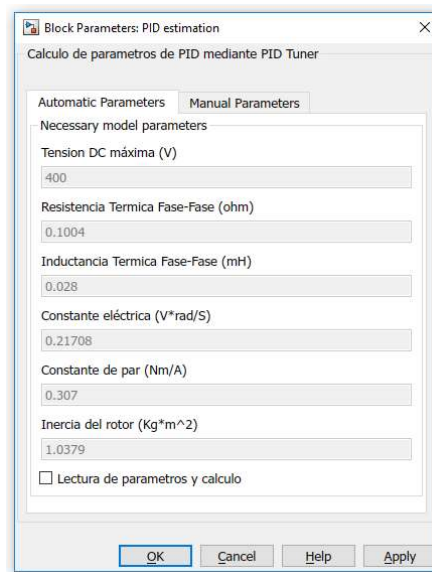


Figura 26 Interfaz de la máscara utilizada en Simulink para calcular la función de transferencia con los parámetros necesarios para su cálculo leídos automáticamente.

Al ejecutar “PIDcalculation”, adjunto en el anexo y la cual se inicia al clicar el apartado Lectura de parámetros y cálculo, muestra en pantalla la función de transferencia como se muestra en la siguiente figura y a su vez, la define en la herramienta de Matlab “PID tuner” con la cual se calculan las constantes del controlador PID.

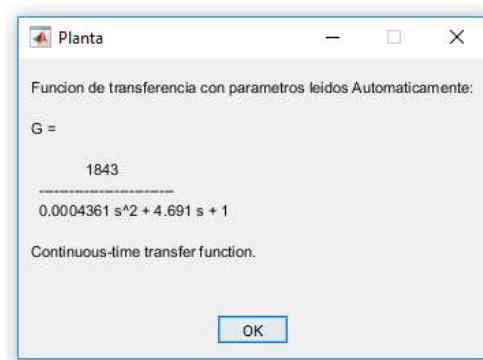


Figura 27 función de transferencia de la planta calculada con “PIDcalculation” en Matlab.

La aplicación “PID tuner” muestra la respuesta y los valores de las constantes del controlador dando como entrada el tiempo de respuesta, el comportamiento transitorio y eligiendo en que ha de centrarse el controlador. Si en mejorar el comportamiento contra perturbaciones o si en seguir la referencia.

Puesto que la aplicación para la que se calcula el PID es controlar la velocidad del motor de un vehículo, el controlador ha de centrarse en evitar que la velocidad sea superior a la deseada. Por lo tanto, los criterios de cálculo son, centrarse en seguir la referencia y tener el mínimo tiempo de respuesta posible sin que haya sobre oscilación ni error de posición.

En el caso de este modelo, además el efecto de cambiar el comportamiento transitorio no afecta significativamente la respuesta frente a perturbaciones. Pero sí que aumenta la sobre oscilación conforme se hace más agresivo el comportamiento transitorio.

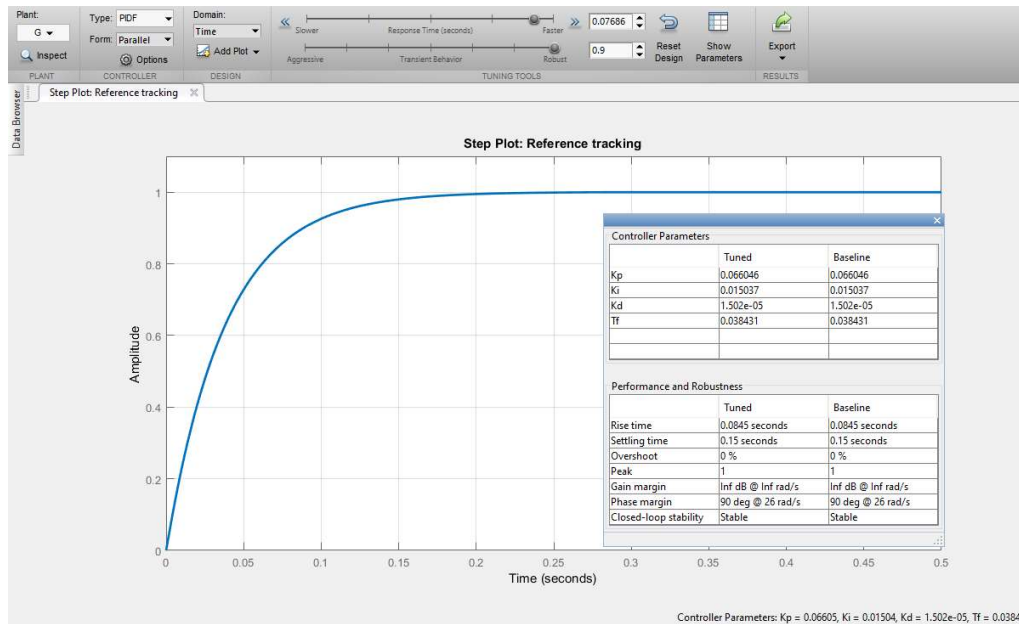


Figura 28 Respuesta del controlador en la aplicación "PID tuner" de Matlab con las constantes ya optimizadas.

Los valores del controlador optimizados se encuentran para un tiempo de respuesta de 0.07686 segundos con la constante del comportamiento transitorio en 0.9. Por los tanto los valores que se cargan en el bloque de Simulink "PID controller" son:

- $K_p = 0.066046$
- $K_i = 0.015037$
- $K_d = 1.502 \cdot 10^{-5}$
- $N = 1/T_f = 26.0208$

Para comprobar el correcto funcionamiento del controlador, se realiza una prueba con el ciclo NEDC usando un convertidor DC/DC de medio puente y una fuente de tensión como batería puesto que aún no se han seleccionado dichos componentes.

La entrada de Par del motor es proporcionada desde el "Workspace" de Matlab calculándolo este como se indica en el apartado *Modelo Dinámico del Vehículo*. El ciclo NEDC es implementado de igual forma que en el apartado mencionado.

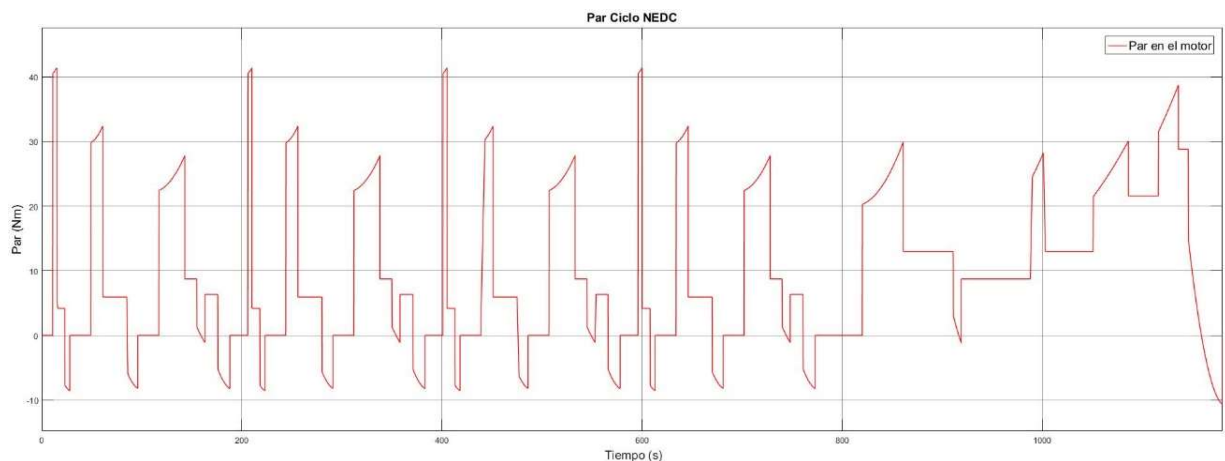


Figura 29 Par ciclo NEDC en el motor

Tras pasar por la reductora el par que ve el motor es reducido en 8.75 dando como resultado el mostrado en la figura anterior.

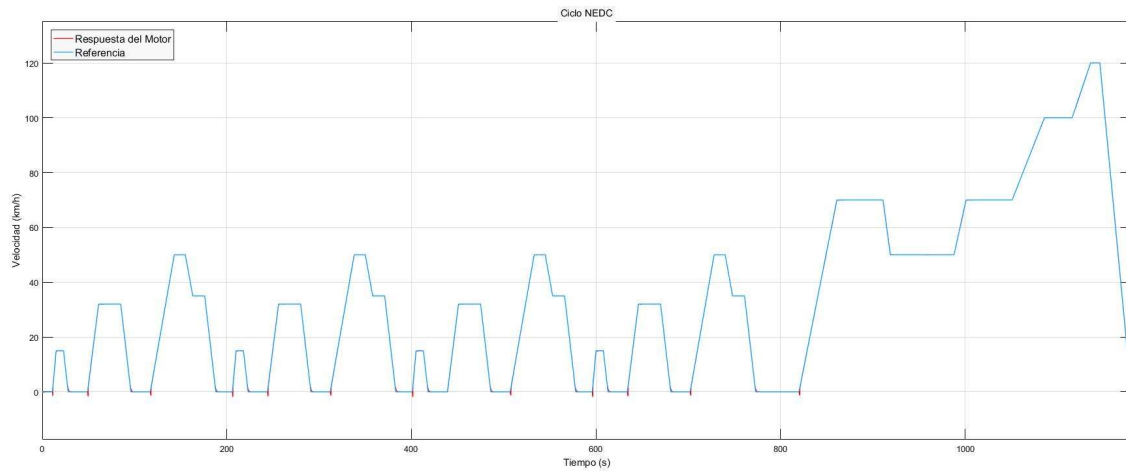


Figura 30 Comparativa de la referencia del ciclo NEDC con la velocidad dada por el motor.

El funcionamiento del controlador es adecuado puesto que la respuesta del motor es igual a la dada por la referencia. Las pequeñas reducciones de velocidad que se producen cuando se acelera desde una velocidad de cero es debido al cambiar de un estado en el que el Par es cero, el vehículo está parado, a un estado de movimiento. Estas reducciones de velocidad son corregidas rápidamente por el controlador.

5. Selección de batería.

Para la selección de la batería es imprescindible tener en cuenta la energía necesaria para realizar los ciclos, la energía de los sistemas auxiliares del vehículo, la tensión que requiere el motor y el espacio disponible para su instalación. Además, hay que tener en cuenta otros aspectos como son la capacidad para soportar diferentes tipos de recargas, la autodescarga que puedan llegar a tener, el ritmo de descarga o el tipo de seguridad que sea necesario instalar para que sean seguras.

Para aplicaciones de tracción los tipos de baterías más utilizadas comercialmente son las basadas en litio, níquel, plomo ácido y las baterías Zebra.

Las baterías Zebra necesitan un sistema para aumentar la temperatura hasta los 400 – 500 °C para que el electrolito pueda reaccionar químicamente por lo que, debido a las estrictas condiciones de espacio del vehículo planteado, y de la mayoría de los vehículos con motores de combustión interna en los que se podría plantear realizar una conversión, quedan descartadas.

Las baterías de plomo ácido no son apropiadas para cargas rápidas y su eficiencia de recarga ronda el 85 - 90 % por lo que no son adecuadas para vehículos a los que se les estime que vayan a realizar recorridos largos. Debido a su coste y al ser una tecnología muy asentada en el mercado su utilización para alimentar los sistemas auxiliares como una batería extra es posible. Se utilizan para alimentar los sistemas auxiliares y sistemas de control de potencia. Para seleccionarla, primero es necesario conocer todos los componentes que no sean de alta tensión del vehículo.

En cuanto a las baterías basadas en níquel y litio hay que distinguir entre los diferentes tipos que existen dentro de cada una de ellas puesto que sus características pueden llegar a variar bastante según el cátodo utilizado.

5.1 Comparación de las baterías basadas en níquel y baterías basadas en litio.

Entre las baterías basadas en níquel se encuentran las siguientes:

- Baterías Níquel metal hidruro (NiMH)
- Baterías Níquel Cadmio (NiCd)
- Baterías Níquel Hierro (NiFe)
- Baterías Níquel Cinc (NiZn)

Para realizar la comparación entre los diferentes tipos se utilizan los datos proporcionados por el artículo [7].

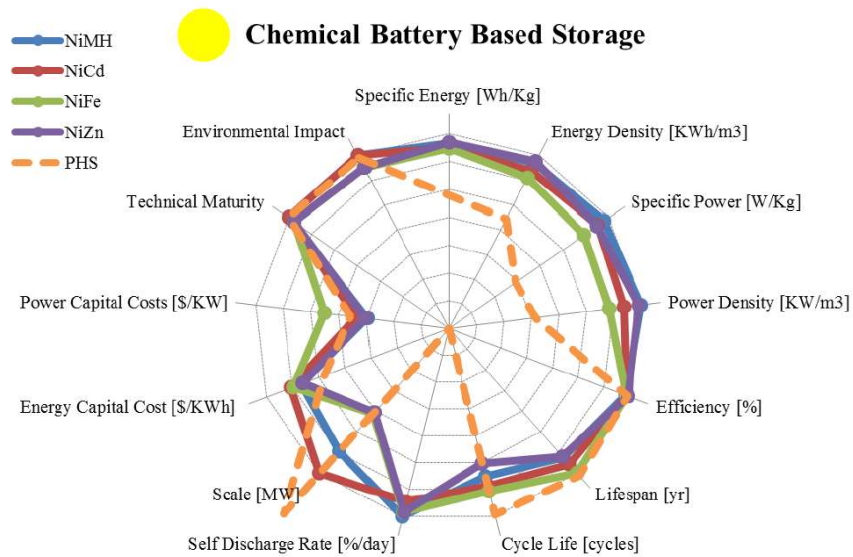


Figura 31 Comparación de los diferentes métodos de almacenamiento de energía química en las baterías más típicas según los datos normalizados y medias logarítmicas del artículo [7].

En la figura anterior se muestra la comparación de las diferentes baterías de níquel y el almacenamiento de energía mediante centrales hidroeléctricas de almacenamiento por bombeo. Entre las baterías de níquel, las NiCd y las NiMH son las utilizadas, o que han sido utilizadas, por los vehículos eléctricos. Las NiMH tienen una mejor densidad y potencia energética, así como una potencia específica mayor lo que implica mejores características para un mismo espacio y peso. Su precio también es algo inferior. Las NiCd tienen una mayor vida útil y su autodescarga es significativamente inferior lo que favorece para vehículos que estén largas temporadas sin utilizarse. La mayor desventaja que tienen ambas baterías es que padecen de efecto memoria, siendo este mayor en las NiCd, lo cual implica que para que mantengan su capacidad nominal el mayor tiempo posible es necesario hacer descargas profundas, lo que desfavorece su utilización en cargas rápidas las cuales suelen hacerse cuando la batería no ha sido descargada totalmente.

Las baterías de litio utilizadas comercialmente más comúnmente para los vehículos eléctricos son las baterías de ion litio (Li-ion). Las baterías Li-ion se dividen a su vez según el material utilizado en el cátodo el cual sigue la estructura Litio-metal-óxido. Una comparativa entre las diferentes baterías Li-ion se puede consultar en el artículo [8]. En él se muestra la gráfica mostrada a continuación.

También existen en el mercado las baterías de polímero de litio. En ellas no se requiere ningún elemento líquido por lo que no se requieren carcasas para las baterías tan amplias como las requeridas en las Li-ion. Son más estables y menos vulnerables a sobretensiones, daños. Tienen largas vidas mientras se almacenan, pero ratios de descarga bajos lo que las hace ideales para aplicaciones que requieran una gran capacidad y una potencia baja. Puesto que los vehículos suelen utilizar potencias relativamente altas, si se compara con otras aplicaciones, se considera que son más adecuadas las Li-ion que estas.

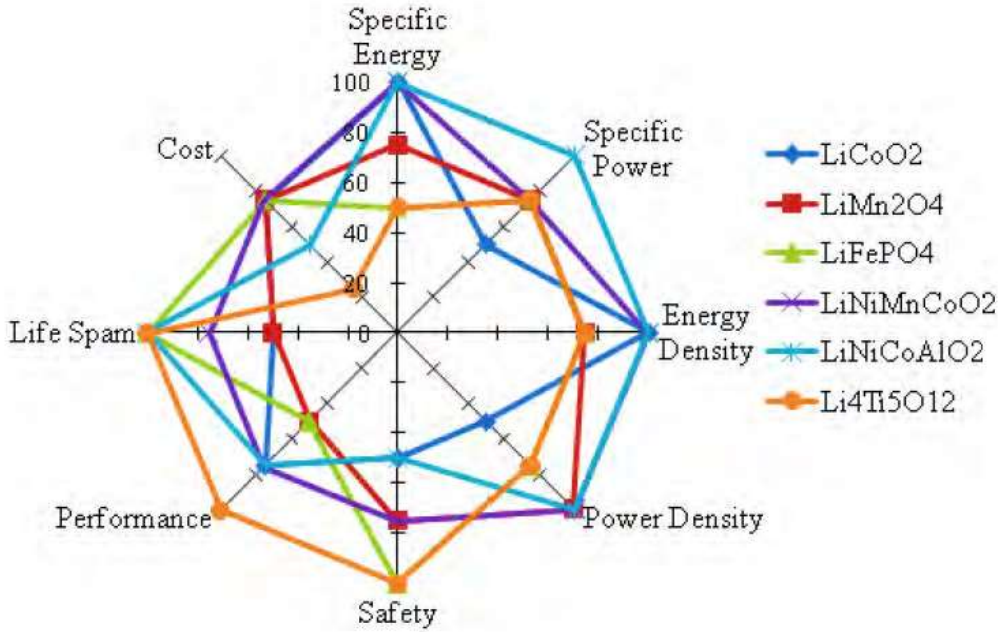


Figura 32 Comparativa entre las diferente baterías Ion litio con los valores normalizados del artículo [8].

Para los vehículos eléctricos el material con mayores características de energía y potencia es LiNiCoAlO2 (NCA), su mayor desventaja es que es menos seguro que el resto de los materiales. Aun así, es una de las mejores opciones a la par que el LiNiMnCoO2 (NMC) el cual, aunque tiene una potencia específica inferior es más seguro. Ambos son instalados comúnmente en diferentes modelos de vehículos eléctricos. Otro de los materiales que se utilizan para vehículos eléctricos el LiFePo4 (LFP) debido a que es de los materiales más seguros con capacidad para tolerar altas temperaturas y tiene un precio inferior al resto de materiales que se utilizan en baterías Li-ion para vehículos eléctricos. La desventaja principal de las baterías Li-ion es la seguridad que requieren para que no sean peligrosas. Si la batería llegara a descargarse completamente durante un periodo largo de tiempo, podría llegar cortocircuitos internos lo que podría aumentar de forma peligrosa la temperatura. En caso de reducir el estado de carga (SOC) por debajo del 20 % o si se cargara por encima del 90 % se reduciría el ciclo de vida de la batería y si se llegara a sobrecargar la batería (cargar la batería cuando esta cuando el SOC es del 100 %) podría provocar la explosión de algunas de las celdas.

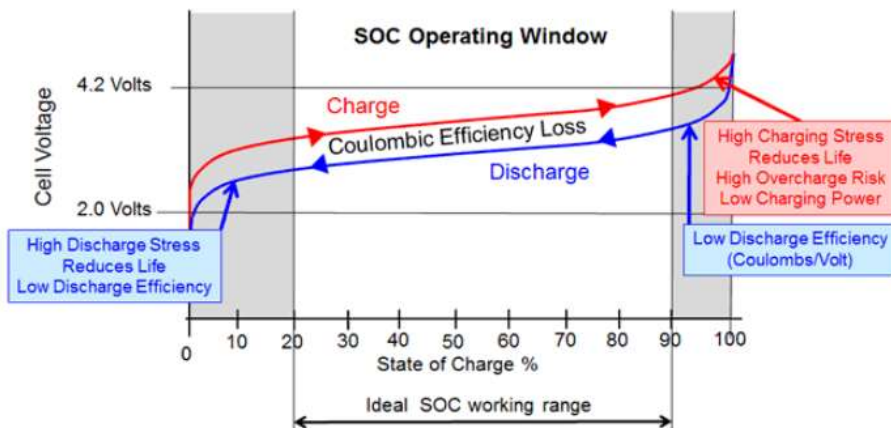


Figura 33 Rango de operación del estado de carga de las baterías Li-ion según la web “electropaedia” con dominio <https://www.mpoweruk.com>.

Para comparar las baterías de Li-ion con las baterías de Ni utilizadas se construye la siguiente tabla con los datos proporcionados por los artículos mencionados en este apartado.

	NiCd	NiMh	Li-ion
Energía específica (Wh/kg)	10 - 80	30 - 90	30 - 300
Potencia específica (W/Kg)	50 - 1000	6.02 - 1100	8 - 2000
Densidad energética (kWh/m ³)	15 - 150	38.90 - 300	94 - 500
Densidad de potencia (kWh/m ³)	37.66 - 141.05	7.80 - 588	56.8 - 800
Eficiencia (%)	59 - 90	50 - 80	70 - 100
Numero de ciclos a lo largo de su vida util (ciclos)	300 - 1000	300 - 3000	250 -10000
Autodescarga (%/dia)	0.07 - 0.71	0.3 - 4	0.03 - 0.33
Rango de temperatura de trabajo (°C)	-40 - +60	-20 - +60	-20 - +60
Voltage nominal por celda (V)	1.25	1.25	3.6
Impacto medioambiental	Alto	Alto	medio/alto
Efecto memoria	Si	Si	No
Descargas profundas	Recomendable	Recomendable	Nada recomendable

Tabla 5 Comparación de parámetros de las baterías de Níquel-cadmio, Níquel-Metal-Hidruro y Ion litio.

Al realizar la comparación entre las dos tecnologías las baterías de Li-ion se considera más adecuada para su instalación a pesar de la seguridad adicional que hay que tener por sus características.

5.2 Dimensionamiento de la batería.

Para dimensionar la batería los datos principales que hay que tener en cuenta son, la energía necesaria a almacenar para el correcto funcionamiento del vehículo, así como el espacio disponible para su instalación y la tensión necesaria en bornes. Para el dimensionamiento se utilizará la energía consumida del ciclo intermedio y el largo planteados en el apartado estudio energético y dinámico.

Los sistemas auxiliares del vehículo que consumen energía en el vehículo planteado (Renault 4 TL) son los siguientes:

Sistemas auxiliares	Potencia (W)	Energía ciclo intermedio (Wh) tiempo =1h	Energía ciclo largo (Wh) tiempo = 2.46 h
Faros (2)	120	120	294.94
Piloto intermitente	21	-	-
Radio	240	240	589.87
Bomba de agua/refrigeración	90	90	221.2
Ventiladores	200	200	491.56
Total	671	650	1597.57

Tabla 6 Consumo energético sistemas auxiliares en situación más desfavorable (De noche, con luces encendidas y con radio enchufada).

Como los pilotos intermitentes se conectan de manera discontinua a lo largo de los recorridos la energía que consumen se considera despreciable puesto que esta es muy inferior al compararla a la total del vehículo. De esta forma los valores que condicionan la batería son:

- Energía necesaria para el ciclo intermedio (kWh): 21.67
- Energía necesaria para el ciclo largo (kWh): 74.32
- Tensión en bornes de la batería (V): 400
- Espacio disponible para instalación de la batería (Cm): 130 x 55 x 60

El espacio disponible se corresponde con la sección del vehículo que aparece al retirar los asientos traseros (en el modelo Renault 4 TL son plegables y pueden ser retirados). De esta forma, aunque el vehículo se convierte en un biplaza se consigue mantener de manera aproximada el espacio original de maletero.

La batería seleccionada se construye mediante módulos de “LG CHEM Lithium Ion Battery”. Las razones por la que se selecciona este módulo son:

- Precio competitivo respecto al resto de módulos en el mercado (735\$ por módulo).
- Preparada para trabajar combinando diferentes módulos para adaptarse a las necesidades del vehículo.
- Batería de ion litio NCM
- Preparada con los conectores y sensores necesarios que requiere el sistema de gestión de la batería (BMS).
- Preparada para instalarse en vehículos.
- Valores de tensión de celda/módulo, potencia, peso y dimensiones aceptables.

Las baterías de ion litio NCM son baterías NMC, en la que se ha cambiado la combinación de los materiales del cátodo de una, en la que el níquel magnesio y cobalto están en la misma proporción, 1-1-1 (1/3 níquel, 1/3 magnesio, 1/3 cobalto) a una estructura 5-3-2 (50% níquel, 30% magnesio, 20% cobalto). Lo que permite reducir el precio de la batería teniendo unas características muy similares.

Al ser una batería Li-ion la energía necesaria para almacenar idealmente el SOC debería mantenerse entre el 20 % y el 90 % lo que implica almacenar un 30 % más de la energía necesaria para los ciclos. Es decir, 28.17 kWh para el ciclo intermedio y 96.62 kWh para el ciclo largo.

Los valores de la batería seleccionada son:

Capacidad por modulo (kWh)	Voltaje nominal celda (V)	Voltaje nominal modulo (V)	Corte por tensión de carga celda (V)	Corte por tensión de carga modulo (V)
2.6	3.8	60.8	4.2	67.2
Corte por tensión de descarga celda (V)	Corte por tensión descarga modulo (V)	Máxima corriente de descarga en 10 s (A)	Altura del módulo (Cm)	Anchura del módulo (Cm)
3.3	52.8	800	36.19	20.32
Longitud del módulo (Cm)	Peso por modulo (Kg)	Precio por modulo (\$)		
15.87	17.24	735		

Tabla 7 Parámetros de los módulos de la batería seleccionada “LG CHEM Lithium Ion Battery”.

Para conseguir la tensión deseada en bornes de la batería es necesario conectar los módulos en serie. Para conseguir una tensión de 400 V los módulos necesarios en serie son $400/60.8 = 6.58$ módulos, por lo que o se conectan 6 módulos en serie consiguiendo 364.8 V, o se conectan 7 consiguiendo 425.6 V. En el espacio disponible para la instalación de la batería caben 18 módulos colocando 6 por fila ($6 \cdot 20.32 = 121.92 < 130$ Cm) en 3 columnas ($3 \cdot 15.875 = 47.625 < 55$ Cm). Para conseguir almacenar la mayor energía disponible se conectan 6 módulos en series en tres ramas en paralelo, escrito comúnmente como 3p6s. Con esta estructura se consigue almacenar 46.8 kWh con una tensión en bornes de 364.8 V. El peso de la batería con 18 módulos es de 310.32 kg. Cada módulo está compuesto por 16s celdas.

Al reducir la tensión en bornes de la batería se reduce la potencia que es capaz de realizar el vehículo a cambio de conseguir una mayor autonomía. La alternativa sería utilizar una estructura 2p7s lo que, sí que permitiría conseguir la tensión en bornes de la batería de 400 V, pero la energía que sería capaz de almacenar la batería se reduciría a 36.4 kWh. Con una energía almacenada de 36.4 kWh no se podría mantener la batería en el rango de trabajo ideal sin hacer una recarga en el ciclo intermedio. Puesto que no hay puntos de recarga a lo largo del ciclo intermedio esta solución queda descartada.

Los 46.8 kWh almacenados permiten realizar el ciclo intermedio manteniendo un margen de 18.63 kWh. Estos 18.63 kWh se corresponden con que, al realizar el recorrido, no se consume el 39.8 % de la energía de la batería, lo que permite mantener el SOC en rango de trabajo ideal. En el caso del ciclo largo, aunque no es suficiente la energía almacenada, tiene a lo largo del recorrido puntos de recarga los cuales permiten realizar cargas rápidas cuando fueran necesarios.

Para saber cuáles son los puntos de recarga que hay que utilizar en el ciclo largo, y saber si es posible realizarlo utilizando estos puntos, se mide mediante el modelo de Simulink que se utiliza para realizar el estudio energético y dinámico, cual es la energía consumida entre los diferentes puntos de recarga y el origen del ciclo.

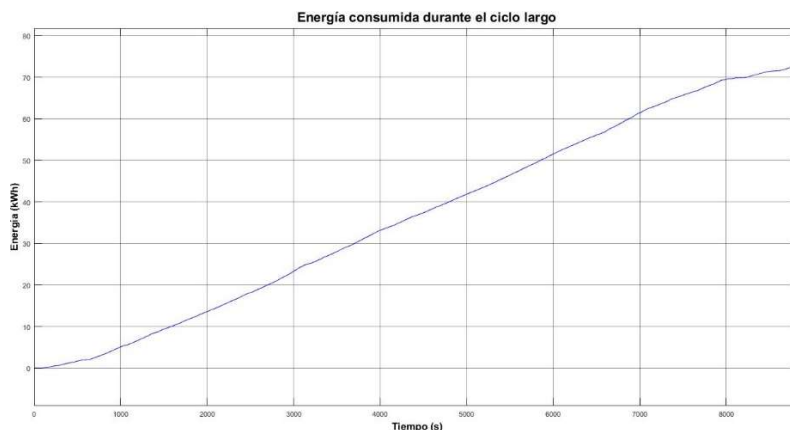


Figura 34 Energía consumida durante el ciclo largo en Simulink.

Con la gráfica mostrada en la figura anterior, la cual muestra la energía que consumiría el vehículo sin tener en cuenta los sistemas auxiliares, la herramienta del bloque “Scope” de Matlab que permite medir los puntos de una gráfica y los datos que se tienen del ciclo obtenidos vía GPS se realiza la siguiente tabla.

Puntos de recarga	distancia desde origen (km)	distancia desde punto anterior (km)	tiempo transcurrido desde el origen (s)	Energía total consumida desde el origen por el vehículo (kWh)	Energía total consumida desde punto anterior por el vehículo (kWh)
primero	33	33	1369.22	8.57	8.57
segundo	85.7	52.7	3096.61	25.029	16.45
tercero	126.9	41.2	4386.39	37.32	12.29
cuarto	199.4	72.5	6661.23	58.86	21.55
Final del ciclo	258	58.6	8848	74.31	15.45

Tabla 8 Datos del ciclo largo entre diferentes puntos de carga.

Para mantener la batería en el rango de trabajo ideal la energía consumida ha de ser inferior a 32.6 kWh. Si se realiza una recarga en el segundo y cuarto punto, la energía consumida sería de 25.024 kWh en el primer tramo, 33.84 kWh en el segundo tramo y 15.46 kWh en el tercero. Con esta solución en el

segundo tramo el SOC podría llegar entorno al 27.7 % que, cargando la batería hasta cerca del 100 %, o hasta el 17.7 % cargándola hasta el 90 %. Aunque estos valores se salen del rango de trabajo ideal, sí que se mantienen cerca de el por lo que se puede considerar una solución válida, aunque se estrese algo más de lo deseado la batería. Otra solución posible es realizar las recargas en el segundo, tercer y cuarto punto lo que mantendría la batería siempre en el rango a costa de realizar una parada extra.

Independientemente de la solución elegida, con ambas se puede concluir que con las dimensiones de la batería planteada se pueden realizar el ciclo intermedio, el largo y por consiguiente el corto, el NEDC y el WLTC.

5.3 Implementación de una batería Li-ion en Simulink.

Simulink permite implementar batería gracias al bloque “Battery” de la librería “Power Systems”. El bloque permite elegir qué tipo de batería es la que se va a modelar, Li-ion, NiMH, NiCd y plomo acido. Una vez seleccionada la batería, esta se puede modelar de dos formas, calculándose los parámetros de descarga de la batería a partir de los valores nominales o especificando los parámetros de descarga de la batería además de los nominales.

En caso de elegir la primera opción los parámetros de descarga se calculan según los valores típicos de la batería seleccionada, lo que permite utilizar parámetros aproximados de la batería si estos no se conocen. Si se conocen los parámetros de descarga, utilizar la segunda opción dará unos resultados más precisos.

Para introducir de manera correcta los valores de la batería que se desea modelar, hay que tener en cuenta que la terminología que utiliza Simulink, no coincide en todos sus parámetros por la usada usualmente por los fabricantes. A que parámetro de la batería se refiere cada término del bloque puede ser encontrada en la documentación de Matlab & Simulink. Un ejemplo de esto se muestra en la gráfica de las características típicas de descarga que se encuentra en dicha documentación.

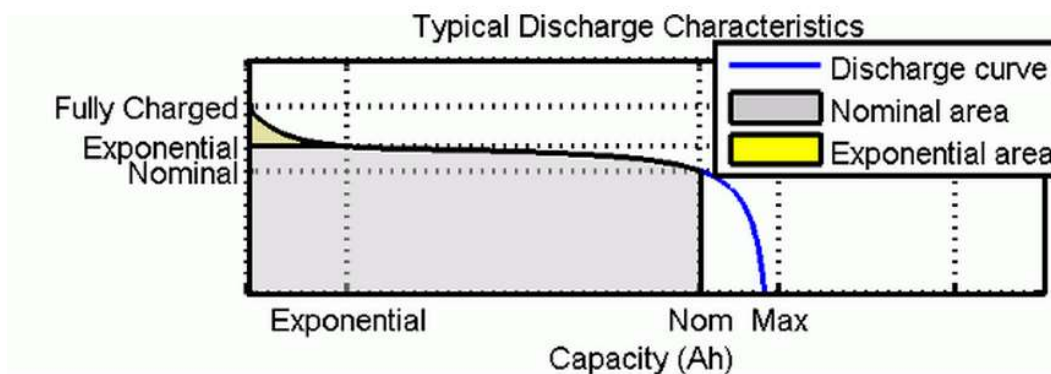


Figura 35 Características típicas de descarga de la documentación de Matlab.

El parámetro “Fully Charged”, especificado en el bloque como “Fully Voltage charged” se corresponde con el parámetro de corte por tensión de carga, siendo este el valor de tensión que tiene la batería cuando está completamente cargada. El parámetro “Exponential bloque” se define en el bloque mediante “Exponential Zone” y corresponde con el valor final de la zona exponencial que comienza en el punto “Fully Charged”. Este valor, se corresponde con un valor próximo a la tensión que tiene la batería en la zona lineal de la misma. En el caso de la batería seleccionada, la tensión nominal. Lo que en la gráfica se denomina Nom, y lo que considera el bloque como la tensión nominal (“Nominal voltaje”), es el punto a partir del cual la tensión comienza a reducirse rápidamente, es decir el fin de la zona lineal. Este valor no es proporcionado en la batería seleccionada, pero se puede obtener, mediante la primera opción para modelar la batería del bloque explicado al comienzo de este apartado, a partir de la “Exponential Zone”.

En los parámetros de descarga además de los nombrados, aparece “*Cutoff-voltage*” el cual se correspondería con el corte por tensión de descarga y es el valor, a partir del cual no es nada recomendable seguir descargando la batería puesto que esta se dañaría. En Simulink, cuando se llega a este valor de tensión el SOC es del 0 %. El parámetro “*Rated capacity*” y “*Maximun Capacity*” son la capacidad nominal de la batería en Ah. Se puede calcular a partir de la tensión nominal y capacidad de la batería seleccionada. El ultimo parámetro de descarga del bloque que modela la batería es “*Internal resistance*”. Este parámetro no está disponible en la batería seleccionada, pero se puede calcular de la misma forma que “*Nominal Voltage*”.

Los valores dados por el fabricante son los valores de los módulos con los que se forma la batería total, los valores de la batería utilizados en el bloque son los del módulo multiplicado por número de módulos en serie o en paralelo según corresponda. Numero de módulos en serie para los referidos en voltios, en paralelo para los referidos en amperios o amperios-hora y el caso de los ohmios (resistencia interna), el número de módulos de serie dividido por el número de módulos en paralelo. De esta forma se consigue modelar la batería dimensionada en simulink.

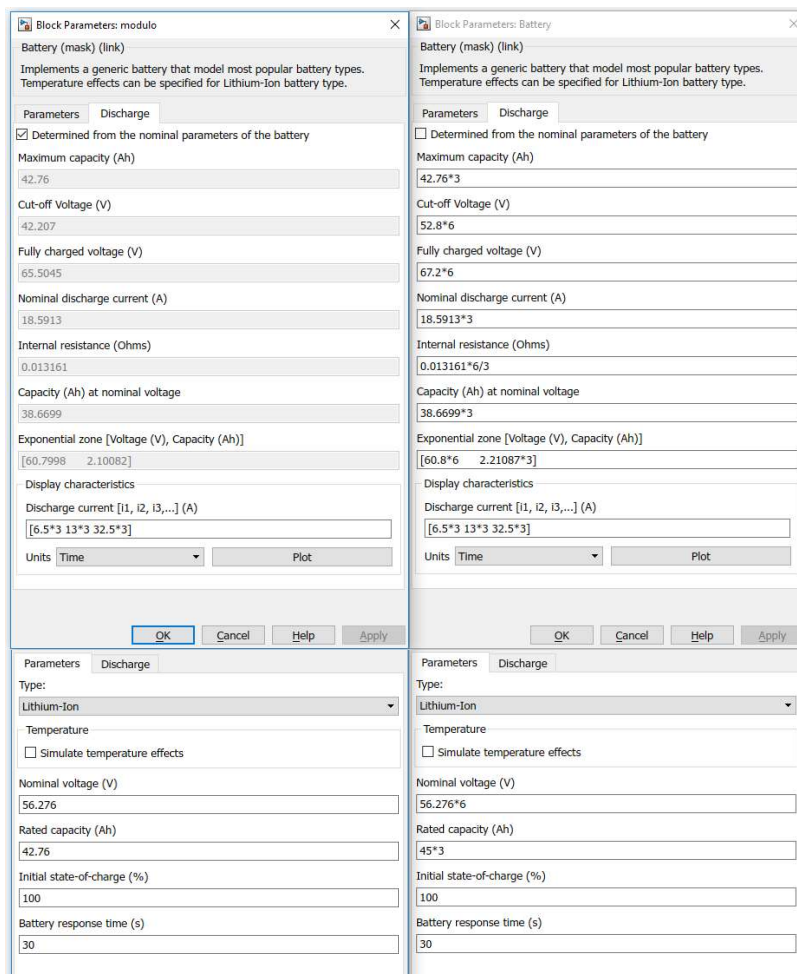


Figura 36 Parámetros de la batería (derecha) y parámetros de uno de los módulos (izquierda) que la forman mediante el bloque "Battery" de Simulink.

Para calcular el voltaje nominal del bloque lo que se ha hecho es comprobar que la relación entre el y el parámetro voltaje de la zona exponencial es lineal en el rango que el voltaje nominal del bloque debida de estar (50 – 61 V en el bloque que representa un módulo). Una vez comprobado, dándole un valor aleatorio dentro del rango al parámetro de la tensión nominal se calcula la relación entre ambos. Con esta relación y conociendo la tensión nominal del módulo de la batería, que se corresponde con el voltaje de la zona exponencial del bloque, se calcula la tensión nominal que ha de tener el bloque que representa el módulo. Con esta tensión y la capacidad nominal, $2600/60.8 = 42.76$ Ah, se calculan de manera automática

los parámetros de descarga como se muestra en lado izquierdo de la figura anterior. Para modelar la batería, cuyos valores se muestran en el lado derecho de la figura, se tienen en cuenta el número de módulos que la componen y se introduce de manera manual los parámetros de descarga que se conocen y los parámetros calculados en el lado izquierdo de la figura en aquellos que no se conocen.

Para comprobar que el modelo es válido se conecta al bloque de la batería una carga la cual tenga una potencia de 46.8 kW con un voltaje nominal de 364 V, una frecuencia nominal de 50 Hz y sin tener carácter inductivo o capacitivo. Para modelar la carga se utiliza el bloque "Parallel RLC Load". Se añade el bloque "Stop Simulation" para parar la simulación cuando la batería este completamente descargada.

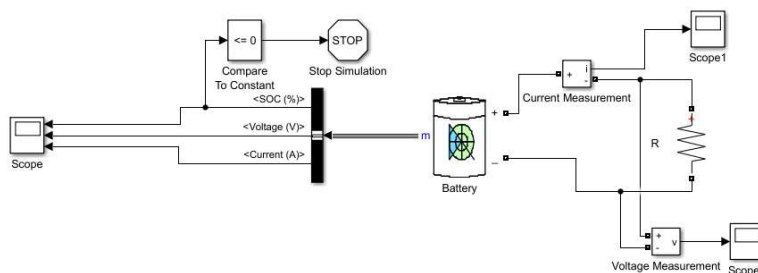


Figura 37 Modelo Para comprobar funcionamiento de la batería en Simulink.

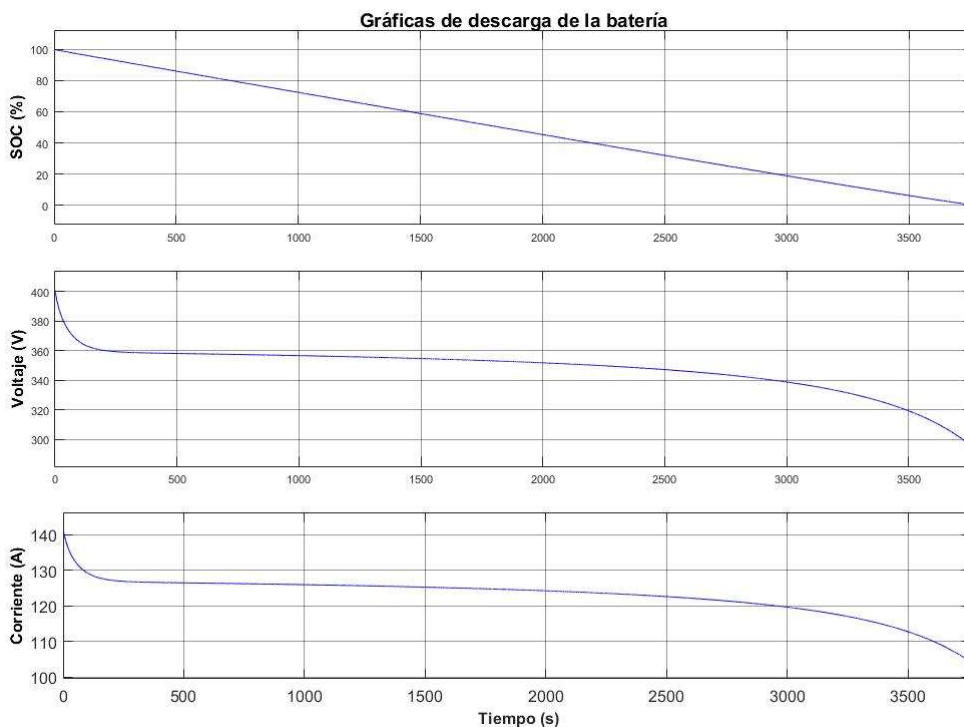


Figura 38 Gráficas de descarga de la batería en Simulink.

Con este modelo de batería y carga, la batería se descarga en 3761 segundos que se corresponden con 1.044 horas. Por lo que la batería tiene una capacidad próxima a los 46.8 kWh de la batería dimensionada. La zona lineal de la curva de tensión también se aproxima lo suficiente a la tensión nominal de la batería dimensionada para considerar que el modelo es válido. Los valores de tensión se aproximan más a los deseados si se reduce la potencia de la carga y se mantiene un SOC alto. Por ejemplo, para una carga de 15 kW y un SOC del 70 % la tensión del modelo de la batería es de 362 V.

6. Sistema de gestión de batería

El sistema de gestión de batería (BMS) es el encargado de que las celdas funcionen dentro de su área de funcionamiento segura (SOA). La SOA consiste en la zona de trabajo de la batería en la que no sufre un riesgo de fallo que aparece en la gráfica que confronta la tensión y la temperatura de la celda. Está delimitada por protección electrónica, mediante el BMS, y protección térmica, mediante Fusibles. También se encarga del cálculo del SOC, de la comunicación entre la batería y los diferentes elementos que alimenta incluyendo el sistema que muestra los datos del vehículo al usuario y de realizar el balanceado de las celdas.

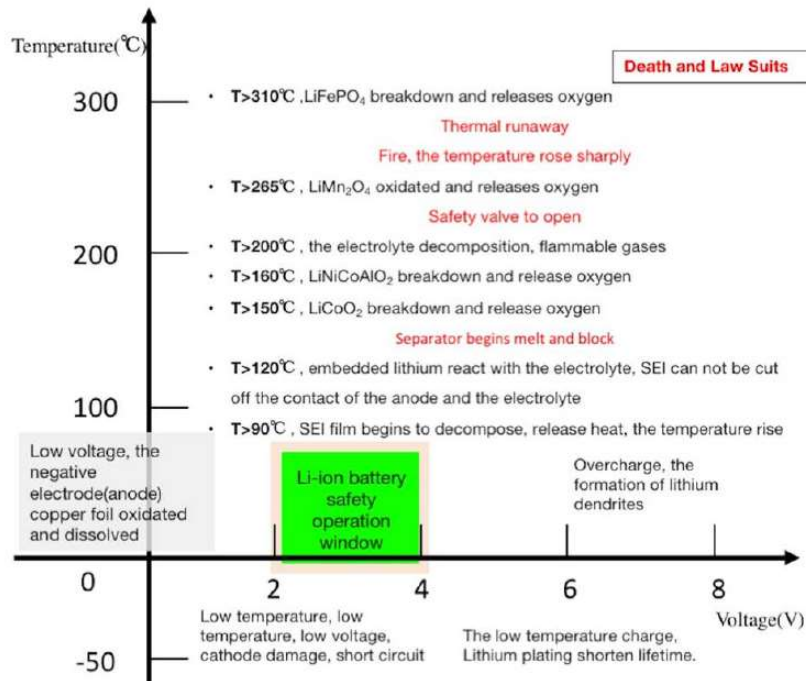


Figura 39 área de funcionamiento segura del Artículo [9].

Comúnmente los BMS cuentan con sensores que permitan medir la tensión y corriente de las celdas y módulos de la batería, así como la temperatura. Además, para que sean funcionales en aplicaciones de movilidad han de ser robustos frente a interferencias electromagnéticas, su potencia y dimensiones han de ser lo más reducidas posibles, tienen que tener elementos redundantes para que, en caso de fallo de alguno de ellos, aun pueda ser utilizado hasta su reparación.

6.1 Balanceado de celdas.

Balancear las celdas es una función muy importante de los BMS que se vayan a instalar en vehículos, celdas con diferentes tensiones en una misma batería puede causar que estas se estropeen, haciendo que la batería entera deje de ser funcional. Existen diferentes causas que puedan provocar esta diferencia de tensión, así como diferentes soluciones para balancearlas. Estas causas y soluciones son explicadas en el artículo [10] del cual se extrae la siguiente figura.

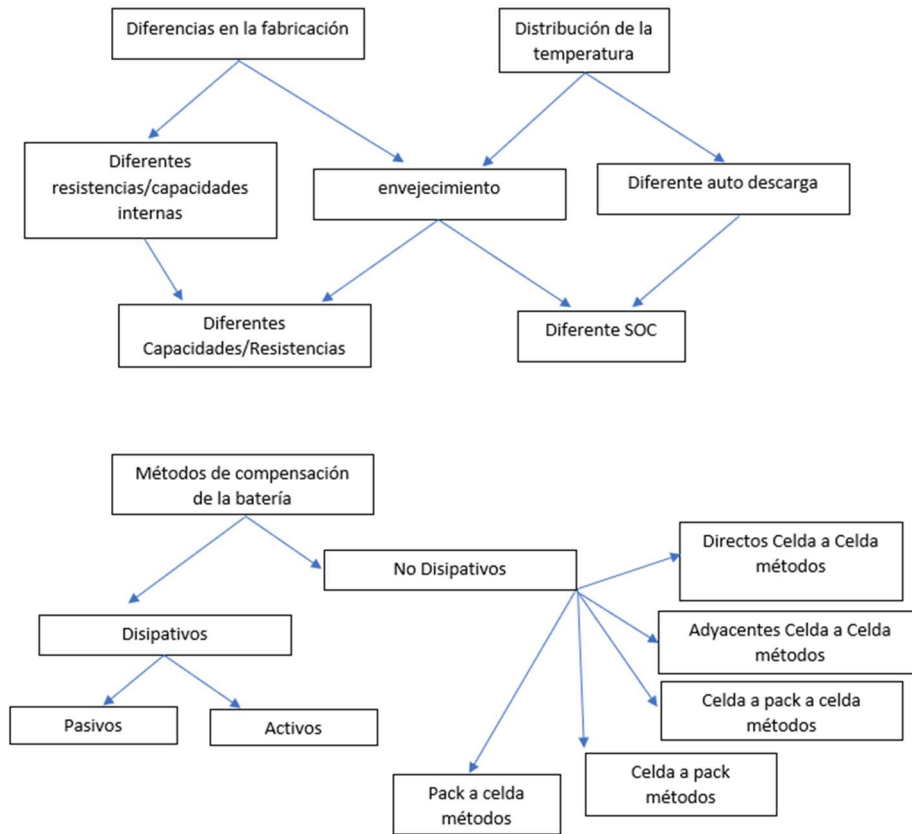


Figura 40 Causas del desbalanceo de las celdas de una batería y sus posibles soluciones del artículo [10].

Los métodos de balanceado más usados comercialmente son los disipativos pasivos, este método consiste en permitir el traspaso de energía entre celdas conectando resistencias entre ellas. El traspaso de energía por las resistencias es comúnmente controlado por el BMS conectando o desconectando un interruptor entre la resistencia y las celdas. Los otros sistemas de balanceado ya sean disipativos activos los cuales consisten comúnmente en el traspaso de energía mediante condensadores o transformadores, o los no disipativos los cuales utilizan electrónica de potencia y algoritmo muy complejos, no son comúnmente usados puesto que implican sistemas más complejos y un incremento del coste del BMS.

6.2 Estado de salud.

El estado de salud (SoH) es calculado comúnmente por el BMS para estimar la esperanza de vida de la batería además de alargarla sustituyendo las celdas que tengan un SoH bajo. Cuando el SoH se reduce, aumenta la resistencia interna. Cuando esta resistencia es lo suficientemente alta puede provocar el límite de sobretensión durante la descarga, reduciendo la capacidad de la batería.

Principalmente el SoH se calcula comparando la resistencia o la capacidad nominal de la celda, con la que tienen en el momento de la medición.

$$SoH = 100 * (1 - R_{nom}/R_{Act})$$

$$SoH = 100 * (1 - C_{nom}/C_{Act})$$

Algunos BMS utilizan en vez de la resistencia o la capacidad, el número de ciclo que espera el fabricante que la batería realice a lo largo de su vida, llamando a estos números de ciclos nominal.

$$SoH = 100 * (1 - \text{número de ciclos/número de ciclos nominal})$$

Este método es más sencillo de realizar, pero al estar basado en un parámetro estimado y no medido, este puede ser menos preciso que los otros dos métodos.

Un concepto relacionado con el SoH es la restante vida útil (Roh) la cual, describe la cantidad tiempo en el cual la batería puede seguir utilizándose. Para estimarlo hay que realizar una evaluación de la capacidad útil de la batería, la probabilidad de fallo y los costes de mantenimiento. Esta información ha sido obtenida del artículo [11].

6.3 Estimación del SOC.

Una explicación en profundidad de los métodos de cálculo del SOC y los filtros utilizados para aumentar la precisión del cálculo es encontrada en el artículo [9]. Los métodos que existen son:

- Método de conteo de Amperios-hora: Consiste en calcular la capacidad que tiene la batería en función de la intensidad de carga o descarga. Es un método de bajo coste pero que pierde precisión a lo largo del tiempo. Se puede aumentar la precisión del método ajustando regularmente la capacidad y el SOC inicial, así como la calibración del sensor de intensidad. Se calcula mediante la fórmula:

$$SOC(k) = SOC(0) + \frac{T}{C_n} * \int_0^k (\eta * I(t) - S_d) * dt$$

Donde:

- SOC (0) = SOC inicial
- T = Tiempo de muestreo
- C_n = Es la capacidad nominal de la batería.
- η = Eficiencia
- I(t) = Intensidad en el instante t
- S_d = Ratio de autodescarga
- Método de tensión del circuito abierto (Método OCV): Consiste en realizar una aproximación de la OCV y el SOC. Sirven para baterías en las que se pueda realizar esta aproximación como las plomo ácido. En el caso de las baterías Li-ion, aunque esta relación es bastante estable, varía con la temperatura ambiental y el punto en el que se encuentra la batería del ciclo de vida, por lo que no se considera un método muy adecuado para las baterías Li-ion.
- Método de impedancia y resistencia interna: La resistencia e impedancia interna pueden determinar las características internas de la batería a partir de una corriente de excitación. Aun así, la relación entre ellas y el SOC no es estable y tiene un alto coste.
- Método electroquímico: El método consiste en identificar la cantidad de litio en uno de los electrodos del modelo electroquímico. Requiere de la resolución de ecuaciones diferenciales parciales lo que lo convierte un método bastante complejo de calcular. Es un método utilizado para análisis de rendimiento de baterías Li-ion
- Método basado en modelos: El uso más común Consisten en realizar modelos electroquímicos y modelos de circuitos equivalentes. Los circuitos equivalentes, son hechos mayormente usando resistencias e impedancias con carácter resistivo-capacitivo. El SOC se puede estimar identificando los parámetros del circuito equivalente. Para aumentar su precisión de la simulación del voltaje se puede usar modelos matemáticos puros con histéresis.

Los filtros que se utilizan para aumentar la precisión y la robustez del SOC calculado, reducir el posible ruido que pueda afectar el modelo de la batería y cuyos algoritmos pueden ser encontrados en el artículo son:

- Filtro Kalman
- Filtro extendido Kalman
- Filtro adaptativo extendido Kalman

- Filtro “*Fading Kalman*”
- Filtro “*Unscented Kalman*”
- Filtro “*Sigma-point Kalman*”
- Filtro de partículas
- Filtro H_{∞}

6.4 Selección BMS.

La selección del BMS se realiza a partir de los datos de la batería seleccionada y el protocolo de comunicación que se utilizara para comunicar los diferentes elementos del vehículo. EL BMS tiene que tener la capacidad de monitorizar 18 módulos y 288 celdas, una tensión de 364 V y una corriente nominal de 129 A. Además, tiene que estar diseñado para baterías de Li-ion, en específico baterías NCM, y utilizar el protocolo de comunicación CAN y ha de tener la capacidad de balancear las celdas. Han de ser capaces de trabajar en aplicaciones de movilidad. El espacio disponible en la sección reservada para la batería tiene un volumen rectangular de 1418.54 cm³ por lo que, para optimizar el espacio, y reducir la longitud entre la batería y el BMS, que el volumen del BMS sea inferior es un requisito deseable, pero no indispensable puesto que se puede instalar al lado de la batería reduciendo el espacio disponible del maletero.

Para la protección de la batería, el BMS ha de realizar el corte por sobretensión en 4.2 V y el corte por tensión final en 3.3 V por celda y la detección de corriente de descarga máxima continua no ha de ser superior a 42.77 A. La temperatura permitida que puede alcanzar la celda es de -25 °C a 70 °C durante la descarga y de 0 °C a 50 °C durante la carga.

En el mercado existen diferentes fabricantes de BMS, en el caso de los que están preparados para funcionar en vehículos eléctricos utilizan una topología modular. Esta topología consiste en utilizar circuitos integrados para la adquisición de datos de los módulos de la batería los cuales, son enviados a una unidad de control electrónica en la que se procesan los datos y se realizan los datos calculados. La razón de utilizar la topología modular es que, en el caso de los vehículos eléctricos, se suele trabajar con varios módulos para formar la batería, en este caso 18, y de esta forma se reduce el número de componentes necesarios que tendrían que ser utilizados en otra topología como por ejemplo la centralizada donde, las celdas de monitorización, los módulos de control de las unidades y el módulo de control del conjunto están unidos en una única entidad.

No se ha encontrado en el mercado un BMS que cumpla las condiciones exactas requeridas por la batería dimensionada, aun así, existen fabricantes que permiten realizar BMS personalizados como “*Tyva modulo*”, “*AA Portable power corp*”, “*Tame-power Tronico*” o “*Litech power*”, eligiendo las tensiones de corte y preparándolo para el material de la batería que es necesario (siempre dentro de unas opciones como, por ejemplo, entre batería LI-ion o polímero de litio).

En el caso en particular de esta batería al tener una topología 16s de celdas y 6s3p de módulos, se puede utilizar un BMS que existe comercialmente que, aunque no esté preparado para esta topología, sigue siendo válido. Esto es debido a que, si se ve la batería como una única entidad, tiene una topología de celdas de 96s3p. El BMS tiene una topología modular con unos circuitos integrados preparados para trabajar con 12 celdas en serie por lo que con $96/12 = 8$ circuitos por rama (24 en total) se puede enviar la información a la unidad de control electrónica y realizar el balanceado de las celdas de forma correcta.

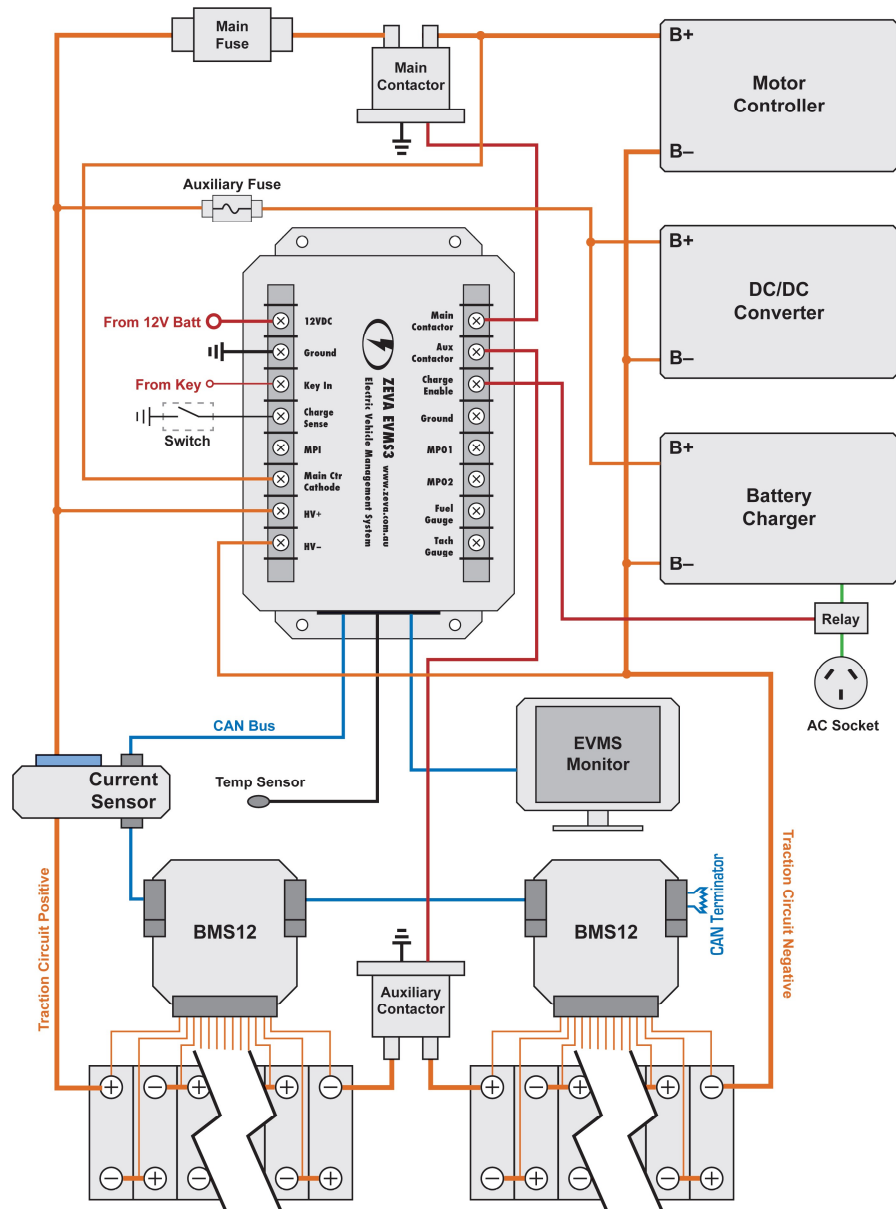


Figura 41 Ejemplo topología modular BMS con 2 circuitos integrados del manual "Electric Vehicle Management System V3" de la compañía ZEVA.

El BMS está formado por 24 "12-cell Lithium BMS Module V3", 1 "Electric Vehicle Management System V3" y su monitor "EVMS Monitor V3" necesario para la configuración del BMS. Pertenecen a la compañía ZEVA (Zero Emisión Vehicle Australia) y permiten la configuración de los umbrales de tensión corriente y temperatura de manera personalizada. Las dimensiones son de 67x67x11 mm y 35 g de peso para los circuitos integrados y 120x100x40 mm con 150 g de peso. Lo que hace un volumen de 1369 cm³ y un peso de 1 kg. Debido a este volumen el BMS se puede instalar junto a la batería.

Este BMS tiene respecto a sus competidores un espacio más reducido y puede modificar sus umbrales mediante un monitor. Su precio por unidad, sin embargo, es muy superior. Estando el precio de la competencia en un margen de 40 a 120 \$, el suyo es por el circuito integrado 155 \$, de la unidad de control electrónica 195 \$ y del monitor para su configuración de 145 \$. El precio total del BMS es por lo tanto de 3130 \$

7. Sistema de recarga de la batería.

Para implementar los componentes necesarios en el vehículo, hay que tener en cuenta cuales son las características de los puntos de recarga que se utilizan, ya sean de instalación privada, como puede ser en garajes de viviendas unifamiliares, o pública, como puede ser el caso de los puntos de carga rápida instalados en párquines. El real decreto Real Decreto 1053/2014, de 12 de diciembre aprueba la instrucción técnica complementaria (ITC) BT 52 en la que se definen las características que han de cumplir las instalaciones de para la recarga de vehículos eléctricos ya sean públicos o privados. La ITC BT-52, no se aplica a sistemas de recarga por inducción o a instalaciones de recarga de baterías que desprendan gases durante su recarga. El real decreto Real Decreto 1053/2014, de 12 de diciembre también modifica otras ITCs del reglamento electrotécnico de baja tensión el cual fue aprobado por aprobado en el Real Decreto 842/2002, de 2 de agosto. Por estas modificaciones, se añaden a la ITC BT-02 “Normas de referencia en el reglamento electrotécnico de baja tensión” las normas UNE-EN 61851-1:2012: “Sistema conductivo de carga para vehículos eléctricos. Parte 1: Requisitos generales.”; UNE-EN 62196-1:2012 y UNE-EN 62196-1/A11:2013: “Bases, clavijas, conectores de vehículo y entradas de vehículo. Carga conductiva de vehículos eléctricos. Parte 1: Requisitos generales.”; UNE-EN 62196-2:2012, UNE-EN 62196-2/A11:2013 y UNE-EN 62196-2/A12:2014: “Bases, clavijas, conectores de vehículo y entradas de vehículo. Carga conductiva de vehículos eléctricos. Parte 2: Compatibilidad dimensional y requisitos de intercambiabilidad para los accesorios de espigas y alvéolos en corriente alterna.” y la norma EN 62196-3:2014: “Bases, clavijas, conectores de vehículo y entradas de vehículo. Carga conductiva de vehículos eléctricos. Parte 3: Compatibilidad dimensional y requisitos de intercambiabilidad para acopladores de vehículo de espigas y alvéolos en corriente continua y corriente alterna/continua.”.

Los modos de carga para los vehículos eléctricos definidos en la norma UNE-EN 61851-1:2012 son los siguientes:

- Modo 1: “Conexión del VE a la red de suministro de c.a. utilizando tomas de corriente normalizadas, de hasta 16 A y de hasta 250 V de c.a. monofásica o de 480 V de c.a. trifásica, en el lado de alimentación y utilizando los conductores de potencia y de tierra de protección.”.
- Modo 2: “Conexión del VE a la red de suministro de c.a. utilizando tomas de corriente normalizadas, de hasta 32 A y de hasta 250 V de c.a. monofásica o 480 V de c.a. trifásica, utilizando los conductores de potencia y de tierra de protección junto con una función piloto de control y un sistema de protección para las personas contra la descarga eléctrica (DCR) entre el E y la clavija o como parte de la caja de control integrada en el cable. La caja de control integrada debe estar situada a un máximo de 0.3 m de la clavija o el SAVE o en la propia clavija.”.
- Carga en modo 3: “Conexión del VE a la red de suministro de c.a. utilizando SAVE dedicados donde la función de piloto de control se extiende hasta el equipo de control en el SAVE, permanentemente conectado a la red de alimentación de c.a.”.
- Carga en modo 4: “Conexión del VE a la red de suministro de c.a utilizando un cargador externo al vehículo, donde la función de piloto de control se extiende hasta el equipo permanentemente conectado a la red de alimentación de c.a.”.

Donde c.a, es corriente alterna y SAVE, es sistema de alimentación de vehículo eléctrico. La potencia máxima que se puede transmitir en el modo 1 y 2 se pueden calcular a partir de los valores de tensión y corriente dados por la norma. Serían 4 kW en monofásica y 13 kW en trifásica para el modo 1 y 8kW en monofásica y 26 kW para el modo 2 pero, en la ITC BT-52 se limitan por seguridad, los valores de los circuitos a una potencia de 3680 W para en el modo 1 y 7360 W en el modo 2, en monofásica y 11085 W en el modo 1 y 22170 W en el modo 2, en trifásica. Además, en el caso de circuitos C13 monofásicos no podrán tener una potencia instalada superior a 9200. El circuito C13 se define en la ITC BT-25 como: “Circuito adicional para la infraestructura de recarga de vehículos eléctricos, cuando esté prevista una o

más plazas o espacios para el estacionamiento de vehículos eléctricos.”. La potencia máxima del modo 3 puede obtenerse a partir de los valores de tensión y corriente máximos de sus conectores los cuales son 63 A y 480 V para trifásica, 52 kW, 70 A y 250 V para monofásica, 17.5 kW. En el caso del modo 4 para conocer su potencia máxima admisible es necesario recurrir en la UNE-EN 62196-1:2012 a la “interfaz del vehículo universal”. En ella, se define una tensión y corriente máxima en corriente continua de 600 V y 400 A, por lo que la potencia máxima en modo 4 es de 240 kW. Además de los modos de carga, en la UNE-EN 61851-1:2012 se definen tres tipos de conexión:

- Conexión A: El cable de conexión está unido al vehículo permanentemente
- Conexión B: El cable es independiente del vehículo o el sistema de carga, el cual ha de ser en corriente alterna.
- Conexión C: La conexión del vehículo a la red de corriente alterna se realiza mediante un cable de alimentación y un conector del vehículo. El cable está unido permanentemente al equipo de alimentación. Este caso es el único permitido para el modo 4.

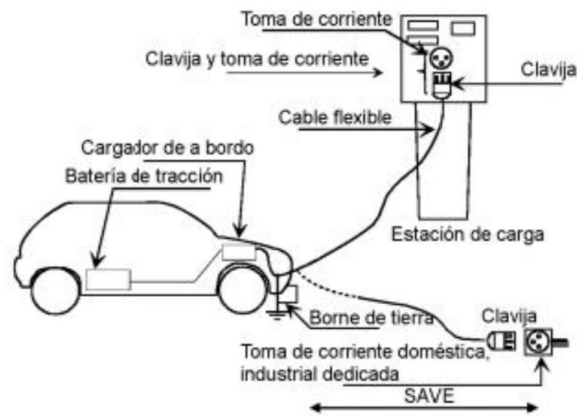


Figura 42 Conexión A norma UNE-EN 61851-1:2012.

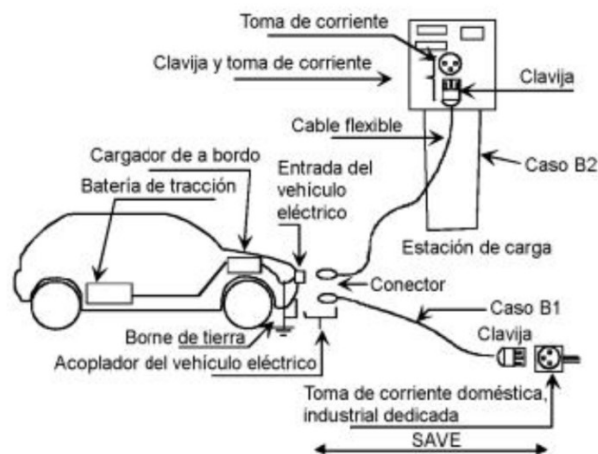


Figura 43 Conexión B norma UNE-EN 61851-1:2012.

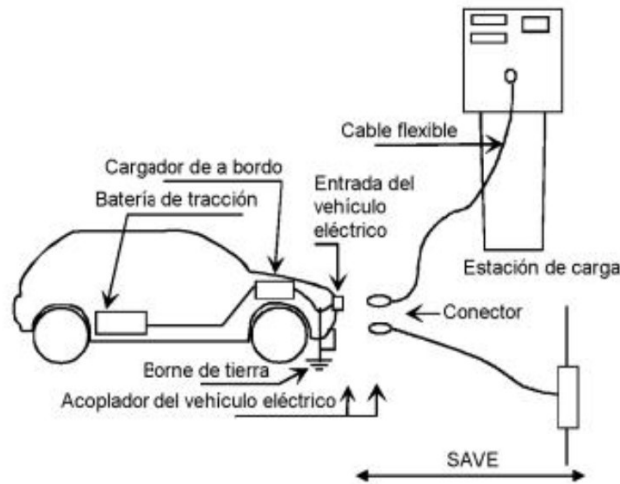


Figura 44 Conexión C norma UNE-EN 61851-1:2012.

Lo que se conoce comúnmente como carga lenta se correspondería con el modo 1, el modo 2 sería una carga moderada, el modo 3 carga moderada (elevada) y el modo 4 se corresponde con la carga rápida.

La carga por inducción aún no está recogida en las normas UNE para vehículos ligeros. Actualmente no existen en el mercado sistemas de carga por inducción que puedan implementarse en vehículos ya construidos. Además, si se tiene en cuenta que para un sistema inducción, en el vehículo hay que instalar el bobinado, apantallado y electrónica de potencia, el sistema ocupa un espacio que no está disponible para la conversión de vehículos ligeros. Si que es una solución para vehículos de grandes proporciones como en autobuses y se presenta como una solución para vehículos ligeros prediseñados para que puedan realizar este tipo de carga.

7.1 Carga lenta y moderada.

Existen varios métodos convencionales para la carga de la batería como son a voltaje constante (CV), a corriente constante (CC) o a potencia constante (CP). Sin embargo, el que se ha estandarizado en el caso de las baterías de litio es un método combinación de los CV y CC. El método corriente constante-voltaje constante (CCCV). El método consiste en comenzar el proceso de carga a corriente constante, cuando se ha llegado al valor de tensión de corte, se mantiene la tensión en ese valor reduciendo la corriente de descarga hasta que esta llega un valor inferior al 3 % de la inicial. Este método, permite realizar cargas más rápidas impidiendo que la batería pueda tener sobretensiones.

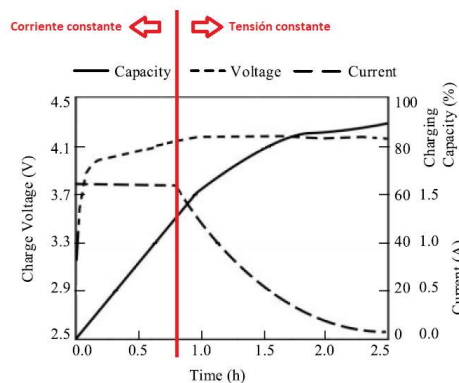


Figura 45 Características típicas de carga de una celda Li-ion. Gráfica modificada (rojo) del artículo [8].

En el caso de la carga lenta el ritmo de descarga (xC) utilizado comúnmente es de 0.1C y en el caso de la moderada suele estar sobre 0.3C. El ritmo de descarga es la relación de la corriente con la máxima

capacidad de la batería. La batería seleccionada, tiene una capacidad nominal de 128 Ah, por lo que puede mantener una corriente de 128 A durante una hora. Para 0.1C la corriente es de 12.8 A y para 0.3C, 38.4 A. Si se limita la carga para que se realice en el modo 2, para no tener que instalar los componentes más complejos del modo 3, se realiza la carga moderada a 0.15C con lo que se consigue que la potencia necesaria para la carga lenta sea de 4.62 kW y para la carga moderada de 6.93 kW, potencias inferiores a las máximas de la norma. Para el modo de carga 2, el sistema de regulación de la carga ha de instalarse en el vehículo y el conector que se puede utilizar es el definido en la norma UNE-EN 62196-2:2012 como tipo de configuración 1, también conocido como conector "Type 1" (SAE J1772).

Para elegir el cargador de abordo, debido al BMS seleccionado existen 2 opciones. La primera opción consiste en seleccionar un cargador no compatible con el BMS y añadir el sistema de control de protección aparte del BMS. La segunda opción consiste en utilizar algún de los cargadores compatibles con el BMS mediante comunicación CAN indicados en el manual "Electric Vehicle Management System V3". Los cargadores admitidos por el BMS son los "TC Chargers". El cargador, ha de admitir una entrada en alterna de 230 V monofásicos a 50 Hz, una salida de tensión de 364 V en DC.

Las características básicas del "TC Charger" que corresponde con los modelos "4th Generation 6.6KW HK-L Series OBC" mostradas en la web del fabricante son:

Basic Specification:
 Input voltage range: AC90V~264V
 Frequency: 45Hz~65Hz
 Power factor: ≥ 0.99
 Efficiency at full-loading : $\geq 93\%$
 Mechanical impact and vibration grade: QC/T 895 -
 2011
 Protection grade: IP67
 Operation temperature: - 40°C ~ 85°C
 Storage temperature: - 40°C ~ 105°C
 Charging control: CAN or Enable
 Size: 270(length) x 230(width) x 110(height) (fan-cooled)
 Cooling way: Enforce Air Cooling, Liquid-cooling

Figura 46 Especificaciones básicas de "4th Generation 6.6KW HK-L Series OBC" mostradas en la web del fabricante "TC charger" con dominio "<http://www.tccharger.com>".

Según el modelo de la serie varía el rango de tensiones de salida y corriente. Uno de los modelos, tiene un rango de tensión del lado DC de 110 – 440 V para el modo CV de la carga y admite una corriente máxima de 20 A. El modelo con estos valores tiene una refrigeración forzada de aire y tiene un precio aproximado, obtenido de vendedores de cargadores, no del fabricante, de 790 \$. El precio de la clavija J1772 es de aproximadamente 90 \$ y del "Control Module AVC2" en el que se encuentra un relé de protección 45 \$. Este relé detiene la carga de la batería si no detecta el piloto de control de conector.

El controlador y el relé pueden ser instalados en el espacio en el que está instalado el depósito de gasolina el cual puede ser retirado al hacer la conversión. Este espacio, se encuentra en uno de los laterales del maletero, por lo que es una posición cercana a la batería lo que reduce la longitud del cableado respecto a instalarlo en la sección delantera del vehículo.

7.2 Carga rápida.

La carga elevada se realiza en el modo 4. En el caso del método CCCV consiste en aumentar el nivel de corriente en el modo CC, siendo 1C un nivel corriente adecuado para la carga rápida. Lo que reduce el tiempo que está en el modo CC. Debido a esto, el tiempo que se encuentra en el modo CV aumenta en proporción al modo CC respecto al que tendría en la carga lenta o moderada. El problema principal de este método es que, al suministrar una corriente elevada continuada, puede provocar que reciba una carga más rápida que las reacciones químicas que se producen en las celdas. Esto provoca sobretensiones locales que pueden dañar las celdas afectadas y la batería. Para solucionar este efecto, en el artículo [12] propone utilizar además del método CCCV, el método de carga por pulsos (PC). En el artículo, se propone un algoritmo para cargar la batería en el modo CC mientras el SOC este entre el 0 y 20 %, cuando se llega al 20 %, se cambia al modo PC hasta que el SOC alcance el 80 % donde se cambiara al modo de tensión constante. El modo PC consiste en corrientes de carga pulsantes de por ejemplo 1 s de tiempo con la corriente de amplitud 1C y un tiempo de microsegundos de reposo de la batería a corriente 0.

En el caso de la carga rápida existen 2 estándares que se utilizan principalmente, sin tener en cuenta el exclusivo que utiliza la compañía Tesla, Chademo y COMBO. El standard Chademo, es un protocolo japonés de carga en DC con una tensión nominal de 500 V, una potencia de carga de hasta 64 kW y protocolo de comunicación CAN. El standard COMBO es un protocolo europeo descrito en la norma UNE-EN 62196-3:2014 como la configuración EE con una tensión nominal de 600 V DC, una corriente nominal de 200 A. Utiliza un protocolo de comunicación PLC. El estándar COMBO también permite la carga en AC en modo 3, el estándar Chademo solo permite la carga en DC y en modo 4.

En el caso de la carga rápida, la electrónica de potencia se encuentra en la estación de carga por lo que no ocupa espacio en el vehículo como ocurre en el caso de la carga lenta y moderada. Diferentes estructuras de carga típicas son definidas en la norma UNE-EN 61851-23:2015.

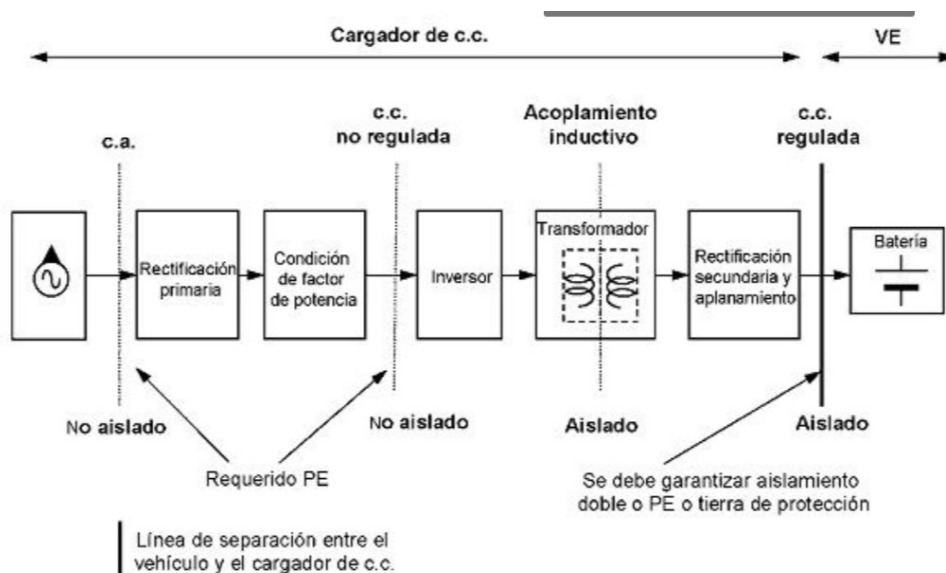


Figura 47 Ejemplo de sistema aislado típico usado para estaciones de carga rápida definido en la norma UNE-EN 61851-23:2015.

En la batería seleccionada, 1C se corresponde con 128 A. Ya que los equipos seleccionados en el vehículo utilizan el protocolo de comunicación CAN, limitando la corriente a 120 A (0.9375C) y no es indispensable la capacidad de cargar el vehículo en modo 3, el estándar Chademo es el adecuado para este vehículo. La clavija que hay que instalar en el vehículo tiene un precio aproximado de 330 €. Para poder controlar la carga desde el vehículo es necesario utilizar "LiBAL Fast Charge Interface CHAdeMO"

sistema que permite la comunicación entre el BMS, mediante comunicación CAN, y el cargador y permite la desconexión del cargador desde el vehículo. Tiene unas dimensiones de 103.5x101.6x42.3 mm lo que permite instalarse junto al cargador "Tc charger". Su precio no es visible hasta la orden de pedido en el fabricante por lo que es desconocido.

7.3 Estimación de tiempos de carga.

Para calcular de una manera aproximada el tiempo de carga que se necesitaría para cargar el vehículo, se utiliza el modelo de la batería que se implementó en Simulink en el apartado Implementación de una batería Li-ion en Simulink, fuentes de voltajes y corriente controladas mediante los bloques "Controlled Voltage Source" y "Controlled Current Source" e interruptores ideales (bloque "Ideal switch") para realizar el cambio del modo CC a CV. Las fuentes de voltaje y tensión se utilizan como una aproximación de la salida del cargador, ya sea el de carga lenta y moderada o rápida. Los interruptores ideales se utilizan para realizar una aproximación del control de los cargadores. Al utilizar estas aproximaciones se reduce de manera muy significativa el tiempo necesario para las simulaciones. El cambio del modo CC a CV se realiza cuando el SOC alcanza el 80 %.

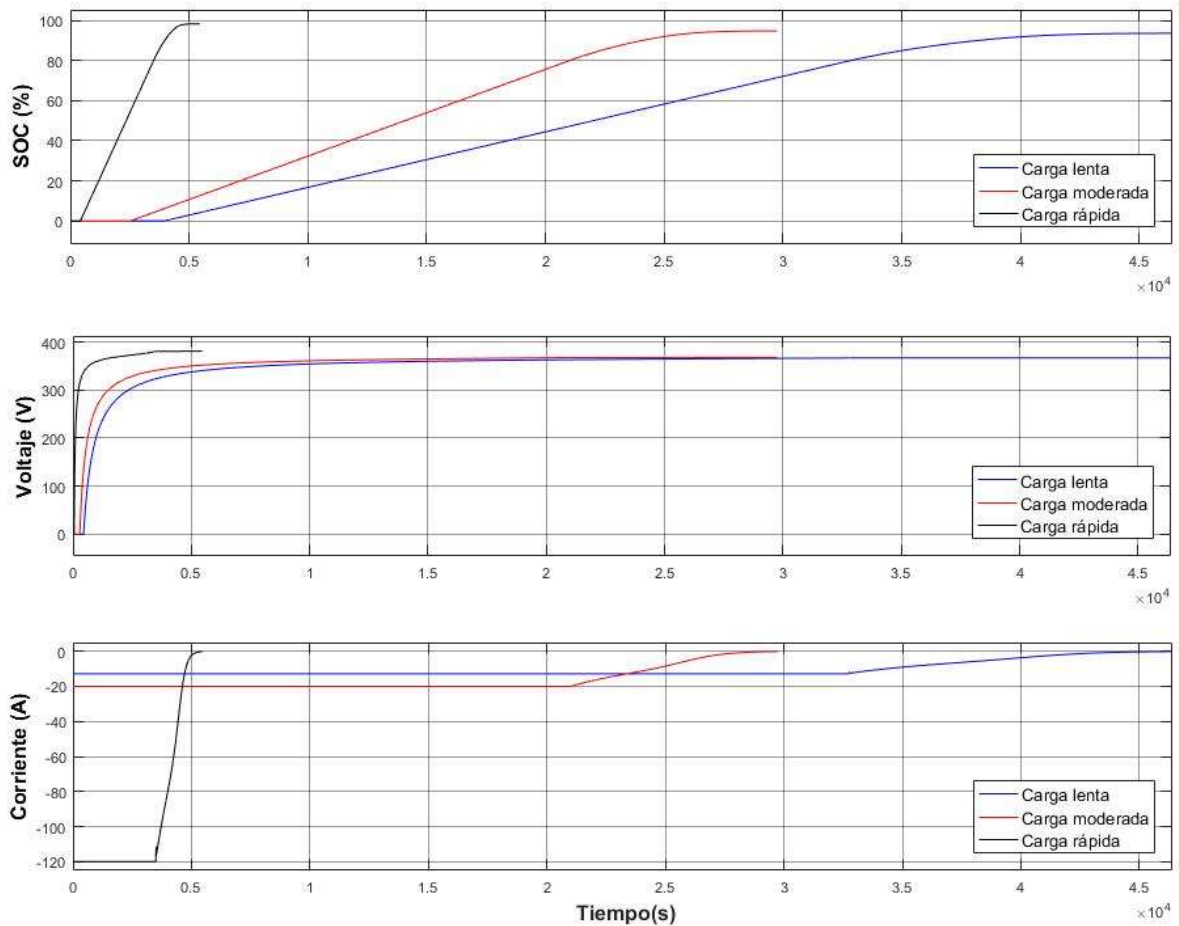


Figura 48 Comparativa carga rápida lenta y moderada mediante Simulink.

Nivel inicial y final de SOC (%) [SOC(inicial)-SOC(final)]	tiempo Carga rápida (h)	tiempo Carga moderada (h)	tiempo Carga lenta (h)
[0-100]	1.53	8.26	12.89
[20-100]	1.28	6.84	10.66
[0-90]	1.10	6.68	10.60
[20-90]	0.86	5.26	8.38
[0-80]	0.97	5.84	9.12
[20-80]	0.87	4.41	6.90
[20-70]	0.63	3.77	5.89

Tabla 9 tiempos estimados de carga de la batería.

Para realizar la carga lenta o moderada, se recomienda realizar la carga en el rango [20-90], se consiguen unos tiempos aceptables para cargar el vehículo durante la noche, donde se puede contratar tarifas con precios reducidos y las horas de carga coinciden de manera aproximada con las horas que se duerme. En el caso de la carga rápida, el rango [20-70] tiene un tiempo aceptable, siendo este de 37.8 minutos. Se podría reducir este tiempo utilizando un estándar de carga que permita una mayor potencia.

8. Convertidores de potencia.

En los vehículos eléctricos se utilizan los convertidores para regular la carga de las baterías, controlar el motor y para obtener el nivel de tensión necesario para alimentar los sistemas auxiliares y sistemas de control. En el caso de vehículos con motores PMBLDC, el control del vehículo se realiza variando la tensión mediante un convertidor DC/DC bidireccional con el que se alimenta un inversor de puente trifásico. En el caso que se utilizara un motor de inducción sería necesario instalar un inversor para alimentar el motor. Para los cargadores en modo 1 y 2, los cargadores suelen estar compuestos por un rectificador para cambiar la tensión de entrada de AC a la tensión de salida en DC y un convertidor DC/DC para regular la carga. Si se quisiera hacer un sistema V2G (“Vehicle to grid”), este convertidor tendría que ser bidireccional y se necesitaría un inversor para el cambio AC/DC.

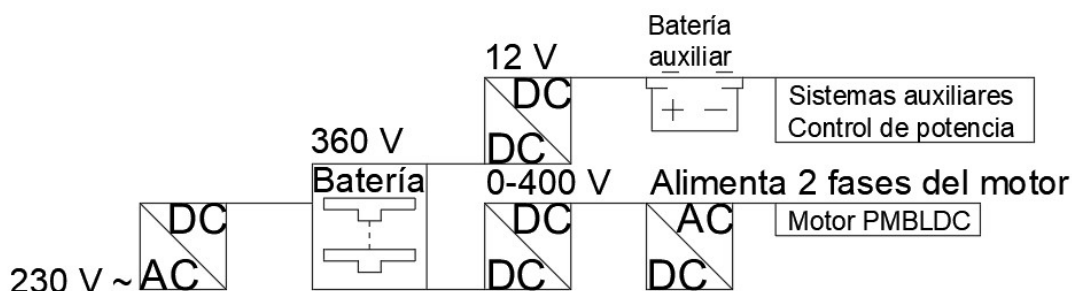


Figura 49 Esquema de niveles de tensiones del vehículo.

El convertidor AC/DC se encuentra en el cargador y el convertidor DC/AC está integrado en motor, por lo que quedan por seleccionar el convertidor DC/DC con salida de 12 V y el DC/DC con salida de hasta 400 V.

8.1 Convertidor DC/DC con tensión de salida máxima 400 V.

Los convertidores bidireccionales más simples serían el convertidor medio puente y el convertidor puente completo. Sin embargo, no existen en el mercado convertidores de este tipo a la venta para la potencia requerida por el motor. Solo se ha encontrado un fabricante que realice convertidores bidireccionales de la potencia requerida. “Tame-Power tronico” realiza convertidores DC/DC que soportan potencias de hasta 60 kW con la topología Buck/Boost bidireccional. Las dimensiones del convertidor son 78x31x85 Cm con un peso de 22 kg. Este convertidor se puede instalar en la parte delantera del vehículo, junto al motor. Aunque el fabricante no facilita el esquema con la variante de la topología que utiliza, la topología es una variación de la topología Buck-boost en el que se le añade un interruptor IGBT con un diodo en antiparalelo y un condensador adicional a la entrada de la tensión.

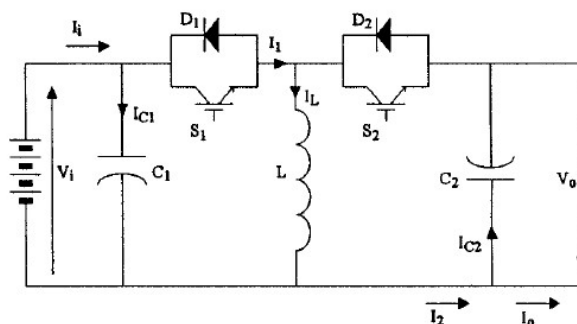


Figura 50 Convertidor Buck-Boost bidireccional del artículo [13].

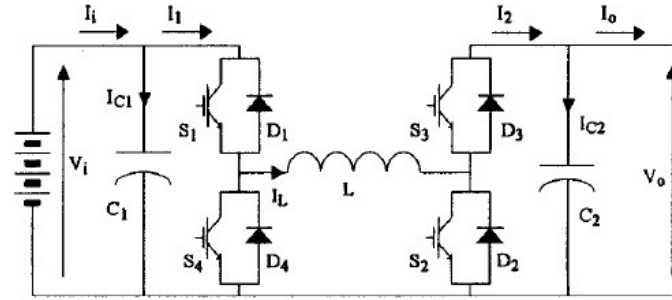


Figura 51 Convertidor Buck-Boost bidireccional en cascada del artículo [13].

Una variación de esta topología que la configuración en cascada, en la que a pesar de duplicar los diodos y los interruptores IGBTs, se reduce el tamaño de los inductores y condensadores. Hay que tener en cuenta que uno de los problemas en los vehículos eléctricos, es reducir el rizado sin tener que utilizar condensadores o inductores de gran tamaño, por limitación de espacio, o utilizar frecuencias muy altas que no se puedan llegar a alcanzar por las limitaciones tecnológicas. El funcionamiento de ambas topologías es explicado en el artículo [13] donde también se indican las ecuaciones de las diferentes intensidades de los componentes.

Para implementar el convertidor Buck-Boost bidireccional en Matlab, hay que definir los valores de los condensadores y la bobina. Partiendo de las ecuaciones de intensidad indicadas en el artículo [13].

$$\Delta I_{L,b} = \frac{V_i \cdot D_b}{f_s \cdot L}$$

$$I_{L,b} = \sqrt{\left(\frac{I_o}{1-D_b}\right)^2 + \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{\Delta I_{L,b}}{2}\right)^2}$$

$$I_{C1,b} = I_o \cdot \sqrt{1-3 \cdot D_b \cdot (1-D_b)}$$

$$I_{C2,b} = I_o \cdot \sqrt{\frac{D_b}{1-D_b}}$$

$$I_{S,b} = I_{L,b} \cdot \sqrt{D_b}$$

$$I_{D,b} = I_{L,b} \cdot \sqrt{(1-D_b)}$$

Figura 52 Ecuaciones de intensidad del convertidor Buck-boost bidireccional del artículo [13].

D_b hace referencia al "Duty" del IGBT S1. El resto de los símbolos hacen referencia a los indicados en la figura 50. Para el cálculo de la inductancia, si se despeja de forma de que dependa de los valores conocidos de entrada y salida, como se demuestra en el anexo, para el mínimo valor que permite conducción continua queda de la forma:

$$L = \frac{V_i^2 \cdot D_b^2}{\sqrt{\frac{11}{12}} \cdot f_s \cdot P_o}$$

El rizado de la corriente depende linealmente del "Duty", el mayor rizado aparece en el "Duty" máximo, en este caso específico, la tensión de salida máxima del convertidor es de 400 V, y la tensión nominal en bornes de la batería es de 360 V. Punto en el que el "Duty" es el máximo permitido, se calcula como se indica en el artículo como:

$$D_b = \frac{V_o/V_i}{1 + V_o/V_i} = \frac{400/360}{1 + 400/360} = 0.52$$

Para reducir el tiempo que tardan en hacerse las simulaciones, usando una frecuencia de 2 kHz. La corriente máxima de salida está limitada por la potencia máxima que pueda dar la batería, con una capacidad de 46 kWh y un coeficiente de descarga 1C la potencia es de 46kW. El valor mínimo de la bobina es de 765.1 μH.

En el caso del condensador, para simplificar los cálculos, se considera que C1 sea igual a C2, el cálculo se realiza a partir de la variación de la carga (ΔQ) en el condensador cuando S1 está cerrado. En esta situación, el condensador C2 es quien alimenta la carga a corriente constante, por lo que ΔQ=Ic2*D*T=C2*ΔV. Al despejar el condensador, como también se demuestra en el anexo, se queda de la forma:

$$C_2 = \frac{P_0}{\Delta V_0 * V_i * f_s} * \sqrt{(1 - D_b) * D_b}$$

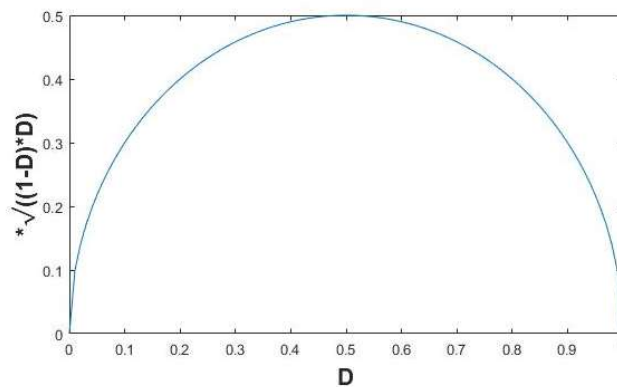


Figura 53 efecto del "duty" en el rizado de tensión. Gráfica realizada en Matlab.

Como se ve en la gráfica anterior, el rizado máximo aparece para un "Duty" de 0.5. Para una frecuencia de 2kHz, una potencia de 46 kW y un rizado del 1% (4 V). El valor mínimo de los condensadores es de 8 mF.

Para la selección del controlador del convertidor se sigue la recomendación del libro [14] en el que para PMBLDC recomienda utilizar un circuito de control de procesamiento digital de señales ("DSP Control Circuit"). En concreto recomienda el modelo TMS320F2812 de "Texas instruments". Es un procesador de señales digitales que permite capturar la velocidad de referencia y las señales para realizar el control, así como implementar el PID para el control de velocidad y si fuera necesario, un PID para regular la corriente. Además, realiza el generador PWM con el que se alimenta los IGBTs del convertidor. También tiene salida en CAN 2.0B, que cumplimenta la norma ISO 11898-1, el cual es compatible con el convertidor seleccionado.

El controlador admite una tensión nominal de 4.6 V. La potencia consumida máxima es de 0.1735 W con una corriente de 50 mA a una tensión de 3.47 V. Las condiciones nominales son 4.6 V con una corriente de 20mA. "Texas instruments" también comercializa "LP2980-ADJ Micropower 50 mA Ultra Low-Dropout Adjustable Voltage Regulator in SOT-23". Un regulador de tensión que admite entradas de tensión de 2.5-16 V con salidas de 1.23-15 V con una corriente máxima de 50 mA. Suficiente para alimentar el controlador.

8.2 Convertidor DC/DC con tensión de salida de 12 V.

En este caso, el convertidor se utiliza para alimentar una batería auxiliar que a su vez tiene que alimentar los sistemas auxiliares y de control. No es necesario un convertidor que permita variar la tensión, pero por seguridad tiene que estar aislado galvánicamente para separar el nivel de alta tensión del vehículo (360 V) con el de baja (12 V).

Teniendo en cuenta que la energía consumida de los sistemas auxiliares más los sistemas de control está en torno a 700 Wh para el ciclo corto y 1600 Wh para el largo, el convertidor y la batería han de ser capaces de realizar este suministro. Para la batería auxiliar de plomo ácido se recomienda que no se hagan descargas por debajo del 30 %, por lo que han tener una capacidad superior a 2080 Wh. La batería UCG230-12 de "Ultracell" tiene una capacidad de 2760 Wh y una corriente de 1C de 110 con un precio de 328,43€. La potencia máxima por lo tanto es de 1320 W. Las dimensiones de la batería son 52.4x24.2x22.6 Cm, tiene un peso de 61 kg y se puede instalar donde se encuentra la batería original de plomo ácido del vehículo.

Como la variación de la tensión de la entrada es muy diferente a la de la salida, $360/12 = 30$, para mejorar la eficiencia de la conversión una solución es realizarla en 2 niveles. Para esto, se puede utilizar las referencias de convertidores de "Texas instruments". El convertidor bidireccional con aislamiento galvánico TIDA-00951 tiene la capacidad de Convertir tensiones de hasta 400 V en 48 V con una potencia de 2 kW. El convertidor bidireccional TIDA-01168 tiene la capacidad de convertir tensiones de 24-54 V a 6 -18 V y soporta potencias de hasta 2 kW. La ventaja principal de utilizar convertidores bidireccionales entre las dos baterías es que en caso de emergencia se podría utilizar la batería auxiliar para alimentar la principal. Los TIDA son ejemplos de diseños posibles no comercializados montados (se pueden comprar las piezas y realizar el montaje). Para tener una aproximación de como serían sus dimensiones y precio se utiliza dos convertidores comerciales de similares características del fabricante VICOR.

El convertidor BCM6123TD1E5135T00 con 260-410 V de entrada, 50 V de salida, 1.875kW de potencia y aislamiento galvánico. Dimensiones 63.34 mm x 22.8 mm x 7.26 mm y precio 279.6 €. El segundo convertidor, NBM6123T60E12A7TOR con tensión de entrada de 36 – 60 V, de salida 12 V, potencia de 2 kW y sin aislamiento galvánico. Dimensiones 61x25.14x7.26mm y precio 253.13 €. Estos convertidores, se instalarían lo más cerca posible a las baterías para reducir el cableado de alta tensión.

9. Cableado y protección.

En el vehículo existen 3 niveles de potencia principales y varios niveles de baja potencia que alimentan desde la batería auxiliar los componentes de control y los sistemas auxiliares. Cada nivel de potencia y tensión tiene que tener un cableado adecuado a sus características. Además, hay que diferenciar entre el cableado eléctrico, utilizado para transmitir la energía requerida entre los diferentes componentes del vehículo, y el cableado de comunicación el cual se utiliza para interconectar los dispositivos mediante protocolo CAN. El cableado ha de estar apantallado para poder evitar posibles interferencias y tiene que tener el aislamiento suficiente para evitar peligros de contactos eléctricos. Ha de instalarse de forma que los usuarios del vehículo no tengan acceso a ellos de forma intencionada. La protección del cableado se realiza mediante fusibles de forma que estos se activen antes de que los cables lleguen a la tensión máxima admisible para evitar que estos puedan estropearse.

Las intensidades de dimensionamiento para el cableado eléctrico son:

- Clavija carga rápida – Batería: 120 A.
- Clavija Carga lenta/moderada – Batería: 20.4 A.
- Módulos de la batería en serie - Bornes de la batería: 45 A.
- Bornes Batería – Convertidor con 400 V de salida – Motor PMLDC: 128 A.
- Bornes batería – Convertidor con salida 48 V: 5.56 A
- Convertidor con salida 48 V – Convertidor con salida 12 V: 41.6 A
- Convertidor con salida 12 V – Bornes batería auxiliar: 166.6 A
- Bornes batería auxiliar – Sistemas de control: < 1 A

Para el caso de la corriente que alimenta el motor, por seguridad se toma como condición lo indicado en la ITC-BT-47 de instalaciones de receptores, motores, que hace referencia a la norma UNE 20460 por la cual para el caso de motores la intensidad de dimensionamiento ha de ser un 125% superior a la que tiene el motor a plena carga. Por lo que se pasa de una intensidad de 128 A, a 160 A.

Para que la selección del cable sea válida, puesto que la protección se realiza mediante fusibles, tendrá que permitir la instalación de fusibles con una intensidad nominal asignada que se encuentre entre la intensidad de dimensionamiento y la intensidad máxima admisible multiplicada por un factor de 0.9.

	Idim (A)	I _{maxadm} (A)	0.9*I _{maxadm} (A)	In fusible (A)	sección cable (mm)	Nombre Cable	Nombre Fusible (fabricante Ferraz Shawmut)	Precio del cable	Precio del fusible (\$)
Clavija carga rápida – Batería	120	169	152.1	150	35	SURCABLE RC4V-K 0,6/1Kv	A50QS150	Sin especificar	30
Clavija Carga lenta/moderada – Batería	20.4	74	66.6	60	10	SURCABLE RC4V-K 0,6/1Kv	A50QS60-4	Sin especificar	18.5
Módulos de la batería en serie - Bornes de la batería	45	74	66.6	60	10	SURCABLE RC4V-K 0,6/1Kv	A50QS60-4	Sin especificar	18.5
Bornes Batería – Convertidor con 400 V de salida – Motor PMLDC	160	207	186.3	175	50	SURCABLE RC4V-K 0,6/1Kv	A50QS175-4	Sin especificar	32
Bornes batería – Convertidor con salida 48 V	5.56	74	66.6	60	10	SURCABLE RC4V-K 0,6/1Kv	A50QS60-4	Sin especificar	18.5
Convertidor con salida 48 V – Convertidor con salida 12 V	41.6	74	66.6	60	10	SURCABLE RC4V-K 0,6/1Kv	A50QS60-4	Sin especificar	18.5
Convertidor con salida 12 V – Bornes batería auxiliar	166.6	207	186.3	175	50	SURCABLE RC4V-K 0,6/1Kv	A50QS175-4	Sin especificar	32

Figura 54 Selección de cables y fusibles.

La tabla hace referencia a los cables y fusibles que habría que añadir al vehículo, sistemas como por ejemplo el de luces o el limpiaparabrisas, ya están instalados en el vehículo y no son necesario cambiarlos.

El cableado del protocolo BUS, es diferente al eléctrico y compañías como ZEVA venden cables preparados para funcionar con el protocolo como el “*Shielded Twisted Pair cable*” para la comunicación en CAN en general, y el “*Orange hookup wire (21AWG)*” para la comunicación entre el BMS y los módulos. AWG hace referencia al estándar estadounidense de secciones para cables. 21AWG corresponde con una sección de 0.4120 mm.

Para evitar malfuncionamientos durante la carga del vehículo, hay que instalar un relé para cada tipo de carga para que los sistemas que las controlan puedan cortarla desde el vehículo en caso de que fuera necesario. Para la carga lenta-moderada con el relé *“Tyco 12 Volt 30 Amp Automotive EV Relay”* con un poder de corte de 30 A es suficiente. Tiene un precio de 7\$. Para el caso de la carga rápida es necesario un relé que pueda cortar corrientes de hasta 120 A como el V23132A2001B200 de *“TE CONNECTIVITY”* con un precio de 60 €.

10. Características finales de vehículo.

De las características finales del vehículo es interesante analizar el peso, el precio de la conversión, su repuesta frente a los ciclos y sus características comparadas con otros vehículos que estén ya en el mercado.

10.1 Peso.

El peso total de todos los componentes seleccionados es de 497kg. Cabe destacar que, de estos, el 64 % pertenece a la batería. Lo que demuestra la importancia de la energía y potencia específica de la batería. De este peso 317 kg son instalados en la sección trasera del vehículo y 180 kg en la delantera. Como muchas partes originales del vehículo que se corresponden con su funcionamiento con un motor de combustión interna han de ser retiradas para la conversión además de los asientos traseros del vehículo, el peso final del vehículo se mantiene de manera similar al original. Hay que tener que originalmente la mayor parte del peso se concentraba en la parte delantera del vehículo y ahora se encuentra en la trasera. A pesar de esto, No se sobrepasa el peso máximo autorizado por eje (PMA 1.º E =520 kg, PMA 2.º E =600 kg) por lo que sigue siendo una distribución de pesos válida.

10.2 Precio estimado de la conversión.

Con los elementos seleccionados en los apartados anteriores, se tienen los elementos principales necesarios para realizar la conversión del vehículo de gasolina a eléctrico. Para la visualización de la velocidad y el estado de la batería durante la conducción, hay que añadir al cuadro de instrumentos una interfaz gráfica como “*Andromeda EVIC Graphical Interface Display*” que permite conocer el estado del motor y de la batería por comunicación CAN. Tiene un precio de 700 \$. Otra opción es cambiar el mando cuadro de instrumentos por completo, y diseñar a partir de por ejemplo una pantalla HMI, toda la interfaz con el estado del motor la batería y los pilotos de avería. También es necesario cambiar el pedal de aceleración por uno electrónico para que la entrada de la referencia de velocidad del controlador la detecte como una variación de tensión. El precio de los pedales electrónicos esta sobre los 80 \$.

El coste del material de las piezas seleccionadas se eleva a 19872\$ y 1251€. Lo que corresponde con una relación 0.9€ = 1 \$ a 19136 €. El precio de homologación depende de la reforma del vehículo teniendo en cuenta que se realizan varias reformas de importancia que se tipifican en el Real Decreto 736/1988, de 8 de julio. En el “Manual de Reformas de vehículos” del ministerio de industria, energía y turismo se indica cuáles son las reformas que requieren de proyecto. Por tener un precio de referencia el precio más alto por una homologación individual mediante la compañía “Certicalia” es de 1400 €. Teniendo en cuenta que la reforma propuesta es cuasi completa, se puede considerar que el precio de la homologación será de los máximos posibles. El precio por convenio según la Disposición 542 del BOE, “*Convenio colectivo nacional de empresas de ingeniería y oficinas de estudios técnicos*”, es de 1200 €/mes para técnicos de cálculo o diseño. Si se presupone un tiempo aproximado para realizar todos los proyectos necesarios para la reforma de 3 meses, se puede estimar que el precio aproximado de la reforma sería de 21736 € como mínimo. A este precio faltaría añadir el precio del cableado eléctrico y del convertidor DC/DC con salida de 400 V.

10.3 Estudio energético y dinámico final.

Las características dinámicas del vehículo, puesto que con la reforma no se varía las partes exteriores del mismo, y la masa máxima autorizada se mantiene igual, para ciclo NEDC el análisis se mantiene igual que el planteado originalmente. En el caso del WLTC, al cambiar la potencia a 46 kW (limitada por la batería a 1 C), con un $P_{mr} = 42.20 \text{ W/kg}$ el ciclo correspondiente es el WLTC clase 3. Las variaciones que se hacen del modelo utilizado en el apartado 3., son: enviar el cálculo del PAR a una variable del

“Workspace” que puede ser utilizada en el modelo del motor+Inversor+Convertidor+Batería como entrada del motor, se añade el ciclo WLTC clase 3 de velocidad máxima superior a 120 km/h (velocidad máxima del vehículo 0 130 km/h) como entrada del modelo físico.

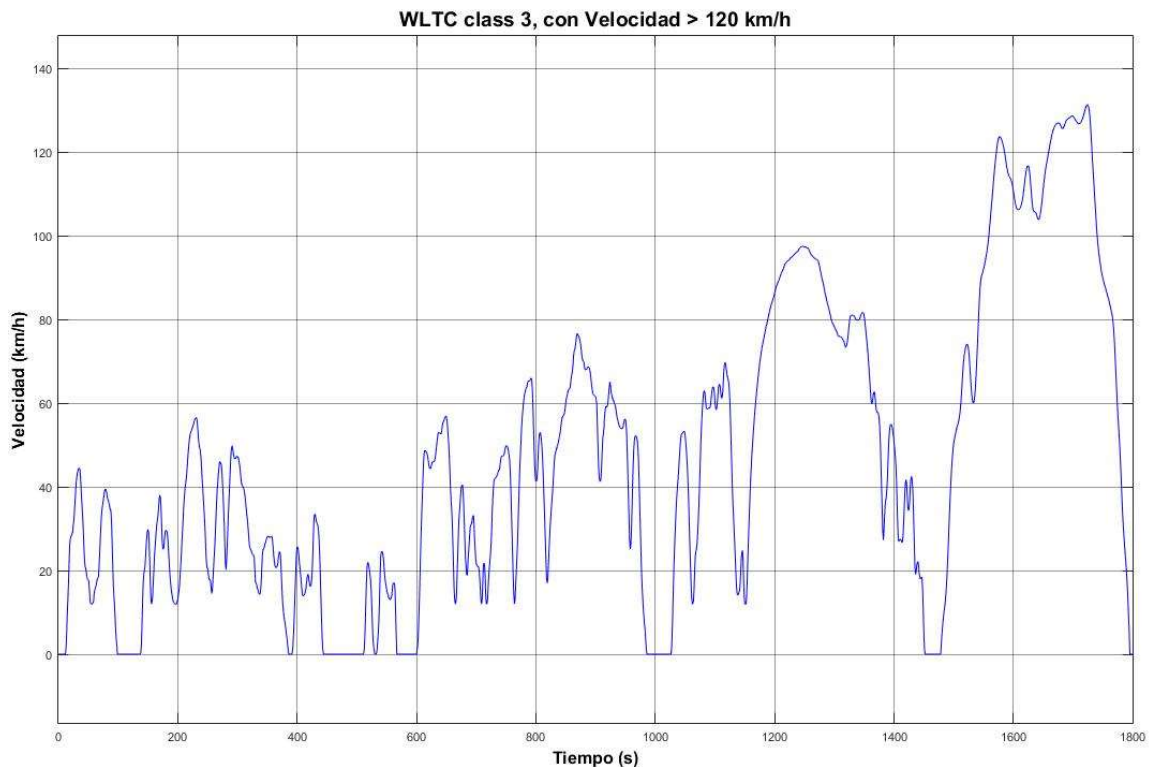


Figura 55 ciclo completo WLTC clase 3 con velocidad superior a 120 km/h en Simulink.

Con este ciclo, se alcanza una velocidad de 131.3 km/h, tiene un par efectivo de 181.9 Nm, necesita una potencia de 23.88 kW y consume 3.946 kWh que corresponde con 0.1696 kWh/km. Valores superiores al WLTC clase 2 pero siguen siendo a los del ciclo intermedio y largo.

Para tener una estimación de cuál sería la respuesta del vehículo frente a los ciclos, se realiza la prueba con el ciclo WLTC de los ciclos normalizados, y el intermedio de los que el vehículo podría realizar asiduamente. Las razones por la que no se ha realizado esta comprobación en el ciclo largo es principalmente por que el equipo con el que se realizan no tiene la capacidad suficiente de memoria para que la simulación se complete. Para realizar una simulación apropiada también sería necesario modelar las cargas rápida, con sus correspondientes cargadores, que ocurren durante el ciclo. El tiempo de simulación necesario para el ciclo intermedio ha sido de aproximadamente 20 h consumiendo el 100 % de la memoria que era capaz de utilizar Simulink del equipo.

La gráfica de velocidad y del modelo del motor alimentándolo con la batería modelada en el apartado 5.3 y con un convertidor Buck-Boost bidireccional para el ciclo intermedio es la siguiente.

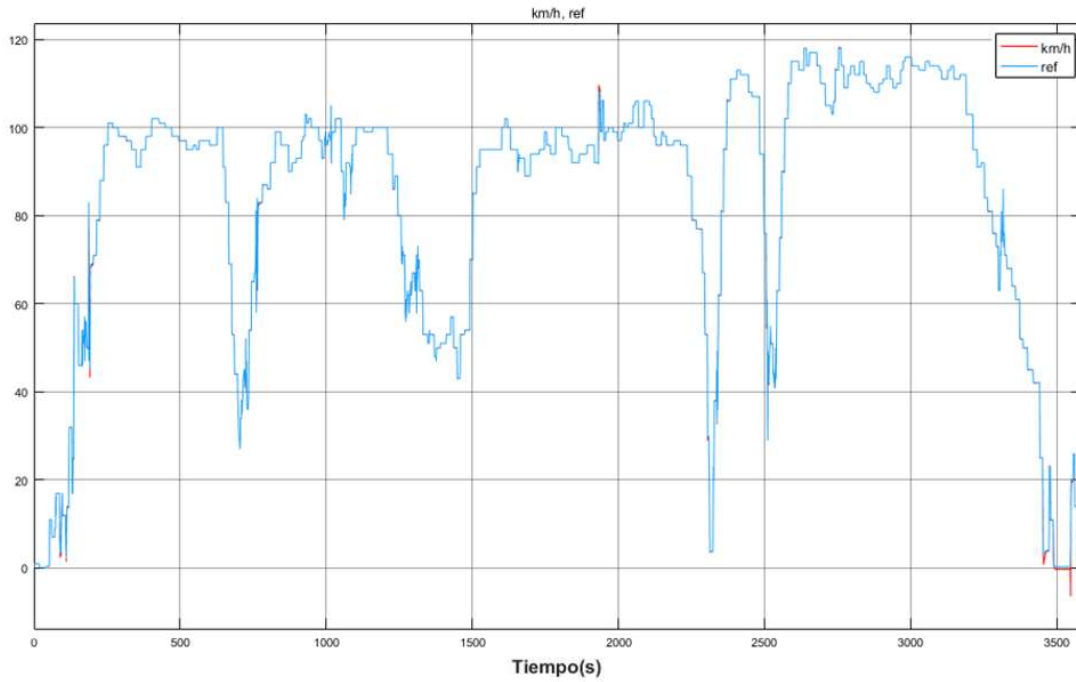


Figura 56 Comparativa de la referencia del ciclo intermedio con la velocidad dada por el motor.

Donde Km/h es la respuesta de velocidad del motor en km/h y “ref” es la referencia de la velocidad. El controlador es el mismo que el diseñado en el apartado 4.1.3 y como se ve en la gráfica es adecuado para el convertidor Buck-Boost bidireccional. La única diferencia respecto al control es que, para el frenado regenerativo, donde el flujo de convierte se invierte, hay que activar el segundo interruptor del convertidor. En la simulación esto se puede implementar fácilmente haciendo que se active cuando el “Duty” es cero, lo que ocurre solo cuando la velocidad de referencia es 0 por lo que no hay flujo de corriente y es indiferente cual es el interruptor cerrado, o cuando se quiere reducir la velocidad, que es cuando se desea que se realice el frenado regenerativo.

La actuación de la batería modelada es la mostrada a continuación, como SOC inicial se ha considerado que la batería estaba cargada al 95 %.

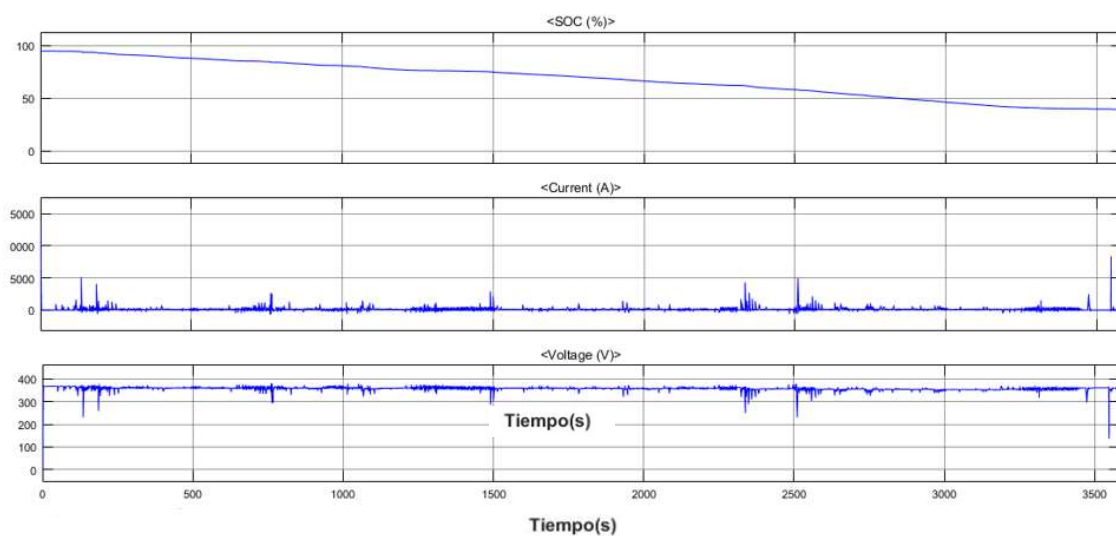


Figura 57 Actuación de la batería durante el ciclo intermedio en Simulink.

El SOC mostrado en la figura se corresponde con el consumido en el ciclo únicamente por el motor, sin tener en cuenta sistemas auxiliares o de control, por lo que el SOC final real sería algo inferior al mostrado en la figura. La variación del SOC inicial (95 %) y final 45 (%) hacen un consumo durante el ciclo del 50 % de la batería, por lo que en el ciclo intermedio podría trabajar en el rango recomendado del 20 al 90 % del SOC. El consumo en la simulación ha sido de 23 kWh que si lo comparamos con el dado por el modelo utilizado en el apartado 3., es algo superior. Esto es debido a como se calcula el SOC en las baterías pues las características de esta varían a lo largo que se va reduciendo el SOC. El consumo de este apartado sería más preciso y sería de 0.27 kWh/km.

Los picos de corriente debidos a los cambios de par durante el ciclo son tan elevados por el carácter matemático de los modelos utilizados, en un equipo real, aunque existirían no serían tan elevados como los que aparecen en la simulación. La variación de la tensión durante el ciclo ha sido de 367 V al inicio de la simulación a 354 V al final, lo que se corresponde con lo visto en el apartado 5.3.



Figura 58 Comparativa de la referencia del ciclo WLTC clase 3 con velocidad superior a 120 km/h, con la velocidad dada por el motor en Simulink.

Para el caso del WLTC el modelo también funciona correctamente. En el caso de la clase 3 que le corresponde, la velocidad se satura en 130 km/h y no puede alcanzar la referencia de 132 km/h de la referencia en el último tramo.

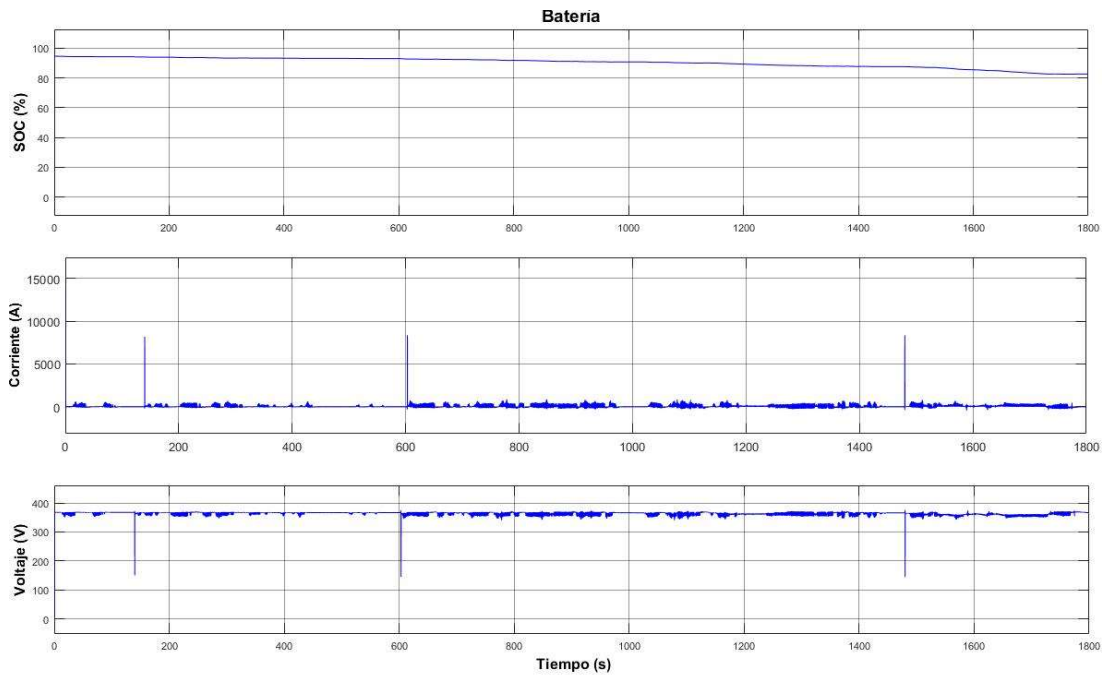


Figura 59 Actuación de la batería durante el ciclo WLTC clase 3 con velocidad superior a 120 km/h en Simulink.

Al igual que en el ciclo intermedio, también aparecen picos de corriente cuando hay variaciones grandes de par. En este caso el SOC consumido ha sido del 11.85 % que corresponde con 5.451 kWh y un consumo por kilómetro de 0.23 kWh/km. También es superior al calculado con el modelo del apartado 3. La razón de que la diferencia sea mayor en este ciclo que en el intermedio con los calculados anteriormente también es debido a que en este caso los picos de corriente que aparecen en las variaciones grandes de par también son mayores.

10.4 Comparativa de vehículos en el mercado con similares características.

Para la asignatura de Movilidad eléctrica (2018 - 2019) del grado de ingeniería eléctrica de la universidad de Zaragoza, se hicieron unas tablas, para el trabajo “Comparativa vehículos de bajas emisiones frente a vehículos de combustión interna” realizado por Marcos Meseguer Laborda, Autor de este Trabajo de fin de grado y César Moreno Argüelles en 2018, en las que se recogían las características de diferentes vehículos según el combustible que utilizaban. A partir de estas tablas, se ha construido la tabla mostrada en el anexo con las características de vehículos con similares características de potencia al planteado y con diferentes tipos de combustibles. con la tabla del anexo, se realiza la siguiente gráfica.

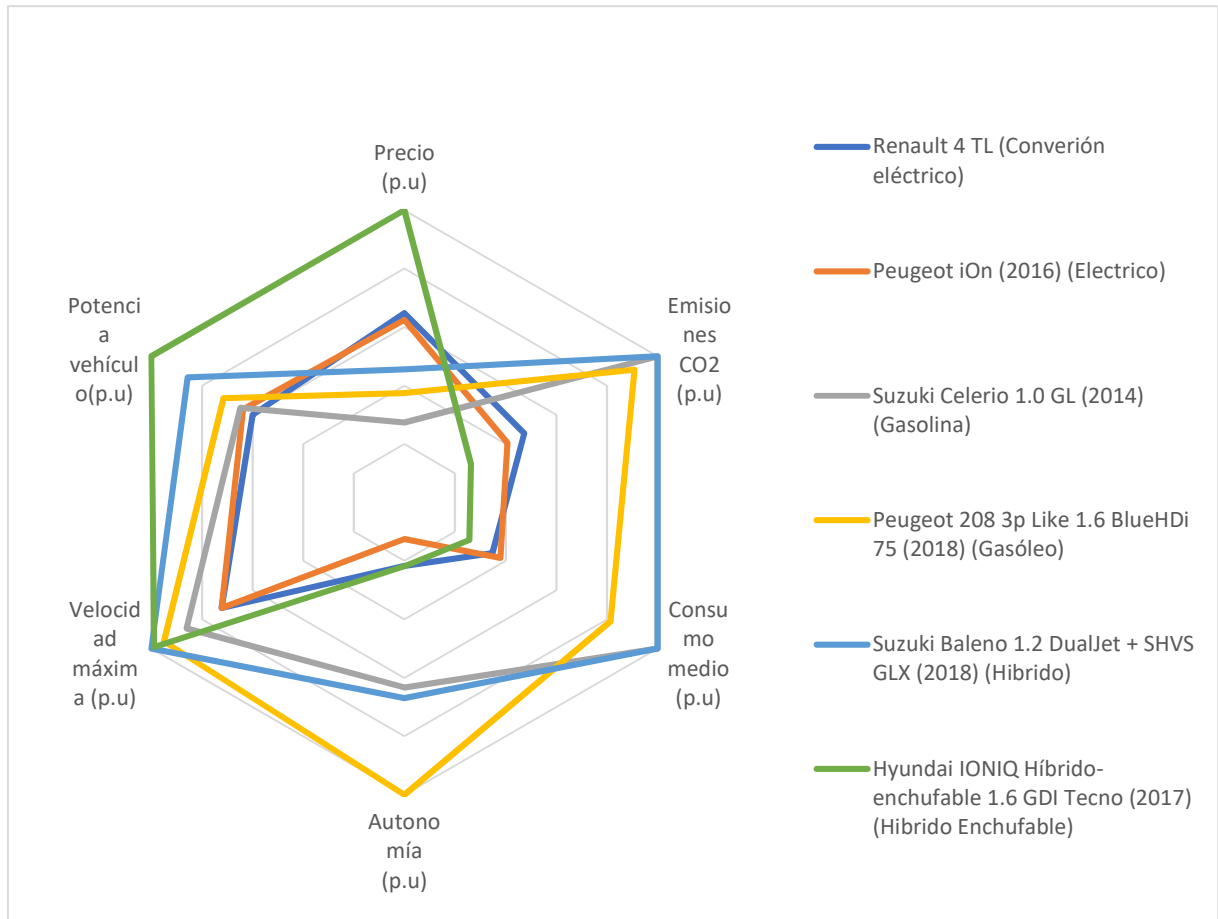


Figura 60 Comparación del vehículo con vehículos comerciales de potencia similar.

Los valores de la gráfica en sistema por unidad utilizan como valores base los máximos de cada característica graficada. Las emisiones de Co2 para los vehículos eléctricos están calculadas con las emisiones de Co2 emitidas por la generación de energía nacional, Dato que es proporcionado por Red eléctrica de España.

La autonomía, así como el consumo medio, son referidos al ciclo NEDC. Los datos han sido obtenidos vía ficha técnica de fabricante o mediante los blogs: km77.com, motorpasion.com y autofacil.es. Para poder comparar el consumo de los vehículos de combustión interna con los vehículos eléctricos se cambia el consumo de los vehículos con motor de combustión interna a kWh a partir de la densidad del combustible (kg/l) y la energía por cada kilogramo de masa (kWh/kg).

Los vehículos elegidos para la comparación son los que tienen unas características de potencia más cercanas al vehículo convertido. De los mostrados, el vehículo con menor potencia es el convertido, los vehículos comparados son los que tienen, o tenían menor potencia de cada uno de los combustibles mostrados.

El vehículo al que se le ha realizado la conversión, muy similares a las del vehículo eléctrico “*Peugeot iOn (2016)*”, pero con un precio de conversión mayor al precio final del vehículo ya en venta. La ventaja del vehículo convertido frente al eléctrico es su autonomía teniendo una muy similar al híbrido enchufable.

Los vehículos con fuente principal de movimiento un motor de combustión interna, tienen mayor autonomía y un precio inferior. El precio puede verse que aumenta conforme el grado de electrificación del vehículo. Esto se debe principalmente a la batería, siendo el elemento más caro de los vehículos eléctricos. Sin embargo, el consumo de energía se reduce también conforme aumenta el grado de electrificación.

11. Conclusiones

A lo largo del trabajo se ha analizado los componentes principales que conforman un vehículo eléctrico y se han desarrollado modelos para poder simular el comportamiento de este frente a los ciclos estandarizados, así como en ciclos que puede realizar un vehículo de manera real. A continuación, se numeran las conclusiones obtenidas:

1. Las características físicas del vehículo en cuanto a pesos y dimensiones tienen un gran impacto en el consumo del vehículo.
2. Los ciclos estandarizados, aunque sirven para realizar la comparación entre diferentes vehículos no son indicativos del consumo de los vehículos en recorridos cotidianos puesto que estos dan consumos inferiores.
3. Aunque los motores PMBLDC tienen buenas características para su utilización como motor para vehículos eléctricos, existen muy pocos en el mercado habiéndose encontrado solamente uno en el que el precio era conocido y uno más aparte del seleccionado que se tuviera características adecuadas para las requeridas por el vehículo.
4. Los datos proporcionados en las fichas técnicas de los motores PMBLDC son en el mejor de los casos insuficientes, faltando información necesaria para poder realizar un modelo preciso del vehículo o un análisis de sus características.
5. Entre los diferentes tipos de baterías las Li-ion destacan frente a su competencia en cuanto a prestaciones y variedad en el mercado. Existen suficientes fabricantes de modelos de baterías con fichas técnicas completas para poder hacer un modelo preciso y una selección que cumpla con las necesidades del vehículo.
6. El peso, las dimensiones y el precio de las baterías son los factores limitantes a la hora de la selección de esta. Estos factores son los más elevados frente al resto de los componentes de un vehículo eléctrico lo que la convierte en el elemento en el que hay que tener más cuidado a la hora de su selección.
7. EL BMS es un elemento fundamental para el cuidado de la batería a la hora de seleccionarlo, hay que tener mucho cuidado de que esté preparado para la batería en el que se vaya a utilizar. Los BMS que se han encontrado a la venta son en su gran mayoría para baterías basadas en litio. Factor que hay que tener en cuenta a la hora de elegir el tipo de batería.
8. La recarga de las baterías, aunque son más baratas de realizar que las de los combustibles convencionales, el tiempo necesario para hacer las recargas es mucho más largo lo que limita a los vehículos eléctricos a la hora de realizar recorridos largos.
9. A la hora de seleccionar el tipo de cargador que se va a utilizar es imprescindible tener en cuenta las características de la batería para no realizar recargas que puedan dañarlas. Según el tipo de batería que se utilice, tiene unas características de recarga diferentes.
10. Encontrar en el mercado los convertidores que soporten potencias medias/bajas para la batería auxiliar no ha sido complicado habiendo varios fabricantes y distribuidores de este tipo de convertidores, sin embargo, para el caso de convertidores DC/DC de alta potencia para el control de motores PMBLDC solo se ha encontrado un fabricante que los realice y no facilita el precio.
11. Para la selección de los cables y las protecciones necesarias en el vehículo, la legislación actual es imprecisa o incompleta para el caso de vehículos no existiendo normas de similares características a las que se pueden encontrar en las ITCs del Reglamento electrotécnico de baja tensión.
12. Los catálogos de cables con apantallamiento necesarios en los vehículos eléctricos tienen pocos distribuidores en el mercado. Además, no se ha podido encontrar un distribuidor que facilite el precio de los cables lo que dificulta más la adecuada selección del cableado.
13. Modelos de las características dinámicas del vehículo como las planteadas en el apartado 2. y 3. Pueden utilizarse para calcular consumos estimados de energía, pero estos serán inferiores a los

que pueden calcularse con un modelo más preciso de los componentes del vehículo como se demuestra en el apartado 10.3 con el modelo de motor+Inversor+Convertidor+Batería.

14. La realización de modelos que contengan elementos que trabajen a alta frecuencia provocan que aumente de manera exorbitada los tiempos de simulación. Es muy recomendable optimizar estos modelos para que consuman los menores recursos posibles del equipo y reducir los tiempos de simulación.
15. El precio de una conversión de las características planteadas sería en el mejor de los casos algo superior al que tendrían vehículos con potencias similares en el mercado. Por lo que la conversión de vehículos eléctricos solo se puede considerar recomendable en el escenario que el vehículo a convertir tenga un valor sentimental por el cual no se quiera cambiar. En el resto de los escenarios es más conveniente la compra de un nuevo vehículo.
16. La autonomía de los vehículos eléctricos es muy inferior a la que tienen vehículos convencionales con un precio bastante superior a potencias similares. Por lo que se puede concluir que el vehículo eléctrico es adecuado para conductores que no necesiten realizar recorridos largos, considerando recorridos largos los superiores a 200 km. Para vehículos de gran potencia, y precio muy elevado, como los de la marca Tesla, sí que tienen modelos eléctricos con autonomías que se podrían aproximar a las de un vehículo convencional.

Propuestas de desarrollo futuro.

Durante la realización del trabajo se han encontrado diferentes desarrollos o aspectos de investigación que serían interesantes de analizar en trabajos posteriores. Son numerados a continuación.

1. Análisis y modelos de motores de inducción y de reluctancia para su utilización de vehículos eléctricos.
2. Estudio de las baterías basadas en níquel para su utilización en vehículos eléctricos.
3. Estudio de Viabilidad de utilizar una única batería para la alimentación del motor, de los sistemas auxiliares y de control.
4. Análisis de recargas superiores a 1C en cargas rápidas para reducir el tiempo necesario para realizarla.
5. Diseño de convertidores de alta potencia para la alimentación de vehículos PMBLDC adecuados para su instalación en vehículos.
6. Diseño de un sistema de climatización y refrigeración para mantener los componentes de un vehículo eléctrico en los rangos de temperatura de trabajo adecuado.

12. Bibliografía

- [1] James Larminie; John Lowry. *"ELECTRIC VEHICLE TECHNOLOGY EXPLAINED"*. John Wiley & Sons Ltd; Segunda edición; 2002.
- [2] Zhi Yang, Fei Shang; Ian P. Brown; Mahesh Krishnamurthy. *"Comparative Study of Interior Permanent Magnet, Induction, and Switched Reluctance Motor Drives for EV and HEV Applications"*. IEEE Transactions on transportation electrification; vol.1; no.3; october 2015.
- [3] A.Kiruthika; A.Albert Rajan; P.Rajalakshmi. *"Mathematical modelling and Speed control of a Sensored Brushless DC motor using Intelligent controller"*. IEEE International Conference on Emerging Trends in Computing, Communication and Nanotechnology (ICECCN 2013); 10.1109/ICE-CCN.2013.6528495. 2013.
- [4] Jian Zhao; Yangwei Yu. *"Brushless DC Motor Fundamentals Application Note"*. MPS; AN047 Rev. 1.0; 5/7/2014.
- [5] R. Krishnan. *"Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives"*. Taylor and Francis Group, LLC; 2010.
- [6] Poria Fajri; Venkata Anand Kishore Prabhala; Mehdi Ferdowsi. *"Emulating On-Road Operating Conditions for Electric-Drive Propulsion Systems"*. IEEE Transactions on Energy Conversion; vol.31; no.1; March 2016.
- [7] Siraj Sabihuddin, Aristides E. Kiprakis and Markus Mueller. *"A Numerical and Graphical Review of Energy Storage Technologies"*. Energies 2015, 8, 172-216; doi:10.3390/en8010172. December 2014.
- [8] Mahammad A. Hannan; Md. Murshadul Hoque; Aini Hussain; Yushaizad Yusof; Pin Jern Ker. *"State-of-the-Art and Energy Management System of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicle Applications: Issues and Recommendations"*. EEE Access;2018;6;10.1109/ACCESS.2018.2817655. April 2018.
- [9] Ruifeng Zhang, Bizhong Xia, Baohua Li, Libo Cao, Yongzhi Lai, Weiwei Zheng, Huawen Wang and Wei Wang. *"State of the Art of Lithium-Ion Battery SOC Estimation for Electrical Vehicles"*. Energies 2018, 11, 1820; doi:10.3390/en11071820. July 2018.
- [10] Markus Lelie; Thomas Braun; Marcus Knips; Hannes Nordmann; Florian Ringbeck; Hendrik Zappen and Dirk Uwe Sauer. *"Battery Management System Hardware Concepts: An Overview"*. Appl. Sci. 2018, 8, 534; doi:10.3390/app8040534. March 2018.
- [11] İlker Aydın; Özgür Üstün; *"A Basic Battery Management System Design with IoT Feature for LiFePO4 Batteries"*. 10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO); 2017.
- [12] Bitra Arabsalmanabadi; Nima Tashakor; Alireza Javadi; Kamal Al-Haddad. *"Charging Techniques in Lithium-Ion Battery Charger: Review and New Solution"*. IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society;2018;1. 2018.
- [13] "F. Caricchi;F. Crescimbin;F.G. Capponi;L. Solero" *"Study of bi-directional buck-boost converter topologies for application in electrical vehicle motor drives"*. APEC '98 Thirteenth Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition;1998;1;10.1109/APEC.1998.647705. 1998.
- [14] Chang-liang Xia. *"PERMANENT MAGNET BRUSHLESS DC MOTOR DRIVES AND CONTROLS"*. John Wiley & Sons Ltd. 2012.

Anexo I Calculo de la ecuación del valor mínimo de la bobina y el condensador para el convertidor bidireccional Buck-Boost.

Partiendo de las ecuaciones de intensidad del artículo [13].

Para el cálculo de la bobina, el límite de conducción continua se da cuando $\Delta I_L = I_L$ siendo I_L la amplitud de la corriente que pasa por la bobina. Por lo que:

$$\begin{aligned}
 I_{L,b} &= \frac{V_i * D_b}{f_s * L} = \sqrt{\left(\frac{I_0}{1-D_b}\right)^2 + \frac{1}{3} * \left(\frac{V_i * D_b}{2 * f_s * L}\right)^2} \\
 \left(\frac{V_i * D_b}{f_s * L}\right)^2 &= \left(\frac{I_0}{1-D_b}\right)^2 + \frac{1}{3} * \left(\frac{V_i * D_b}{2 * f_s * L}\right)^2 \\
 \left(\frac{V_i * D_b}{f_s * L}\right)^2 - \frac{1}{3 * 2^2} * \left(\frac{V_i * D_b}{f_s * L}\right)^2 &= \left(\frac{I_0}{1-D_b}\right)^2 \\
 \left(\frac{V_i * D_b}{f_s * L}\right)^2 \left(1 - \frac{1}{3 * 2^2}\right) &= \left(\frac{I_0}{1-D_b}\right)^2 \\
 \left(\frac{V_i * D_b}{f_s * L}\right)^2 &= \frac{11}{12} \left(\frac{I_0}{1-D_b}\right)^2
 \end{aligned}$$

Considerando además que: $I_0 = \left(\frac{P_0}{V_0}\right) = \left(\frac{P_0}{\frac{D_b * V_i}{1-D_b}}\right)$, en el artículo se da la relación entre V_0 y V_i como

$$V_0 = \frac{D}{1-D} * V_i$$

$$\begin{aligned}
 \left(\frac{V_i * D_b}{f_s * L}\right) &= \sqrt{\frac{11}{12}} * \left(\frac{I_0}{1-D_b}\right) = \sqrt{\frac{11}{12}} * I_0 * \left(\frac{1}{1-D_b}\right) = \sqrt{\frac{11}{12}} * \left(\frac{P_0}{\frac{D_b * V_i}{1-D_b}}\right) * \left(\frac{1}{1-D_b}\right) \\
 \left(\frac{V_i * D_b}{f_s * L}\right) &= \sqrt{\frac{11}{12}} * \left(\frac{P_0}{D_b * V_i}\right) \\
 \frac{V_i^2 * D_b^2}{f_s * P_0 * \sqrt{\frac{11}{12}}} &= L
 \end{aligned}$$

Para el cálculo del condensador por las características de la corriente que pasa por él, que se puede ver en el artículo, al definirse el periodo como $T * D_b = t_{on}$ hace que $\Delta Q = I_{c2} * D_b * T = C_2 * \Delta V_0$ por lo que:

$$\begin{aligned}
 C_2 * \Delta V_0 &= I_0 * \sqrt{\frac{D_b}{1-D_b}} * D_b * T = \left(\frac{P_0}{\frac{D_b * V_i}{1-D_b}}\right) * \sqrt{\frac{D_b}{1-D_b}} * D_b * T \\
 C_2 &= \left(\frac{P_0}{\frac{D_b * V_i}{1-D_b}}\right) * D_b * \sqrt{\frac{D_b}{1-D_b}} * \frac{1}{\Delta V_0 * f_s} = \left(\frac{P_0}{\Delta V_0 * f_s * V_i}\right) \sqrt{\frac{D_b * (1-D_b)^2}{1-D_b}} \\
 C_2 &= \left(\frac{P_0}{\Delta V_0 * f_s * V_i}\right) \sqrt{D_b * (1-D_b)}
 \end{aligned}$$

Anexo II Tablas de comparación de vehículos comerciales.

Ciclo NEDC						
Datos km77.com, motorpasion.com y autofacil.es						
Combustible	Modelo	Precio (€)	Velocidad máxima (km/h)	Aceleración 0-100 km/h (s)	Consumo urbano (l cada 100 km)	Consumo extraurbano (l cada 100 km)
Gasolina	Suzuki Celerio 1.0 GL (2014)	9190	155	14	5.1	3.7
Gasolina	Fiat 500 1.2 Collezione (2018)	15110	160	12.9	6.2	4.2
Gasolina	Nissan Micra 1.0 G Visa+ (2018)	15350	158	16.4	5.9	3.8
Gasolina	Seat Mii 5p 1.0 style edition plus (2018)	12160	172	13.5	5.4	3.8
Gasolina + start/stop	Kia Rio 1.2 CVT Concept (2018)	11972	170	12.9	6.4	4.7
Gasolina + start/stop	Ford Fiesta 3p ST-Line 1.0 EcoBoost S/S (2018)	17258	202	9	6	4.4
Gasolina + start/stop	Alfa Romeo Giulia 2.0 Turbo Executive Aut. 8 vel. (2018)	44490	230	6.6	8.4	4.6
Gasolina + start/stop	Skoda Octavia 1.4 TSI Style (2017)	23278	219	8.1	6.7	4.3
Gasolina + start/stop	Ford Mondeo Berlina Titanium 1.5 EcoBoost (2018)	29242	222	9.2	8.3	5.6
Gasolina + start/stop	Seat León SC 1.8 TSI Start&Stop (2016)	23640	226	7.4	7.5	5.1
Gasolina + start/stop	Audi A4 2.0 TFSI quattro-ultra S tronic 7 vel (2017)	48040	250	5.8	7.4	5.4
Gasolina + start/stop	BMW 530i Berlina (2016)	58050	250	6.2	6.9	4.7
Gasolina + start/stop	Volvo S90 Momentum Aut. (2018)	54700	230	6.8	8.6	5.3
Gasolina + start/stop	Mercedes-Benz C 300 Berlina (2018)	49250	250	5.9	8.9	5.1
Gasolina + start/stop	Alfa Romeo Giulia 2.0 Turbo Veloce ATX aut. 8vel (2016)	55340	240	5.2	8.9	4.9
Gasolina + start/stop	Porsche Panamera Turbo Executive (2016)	149811	306	3.9	12.9	7.3
Gasolina + start/stop	BMW MS Competition (2018)	148199	250	3.3	14.4	8.1
Gasolina + start/stop	Mercedes-Benz Mercedes-AMG GT 63 S 4MATIC+4 Puertas Coupé Edition 1 (2018)	218496	315	3.2	15.2	8.9

Combustible	Modelo	Precio (€)	Velocidad máxima (km/h)	Aceleración 0-100 km/h (s)	Consumo urbano (l cada 100 km)	Consumo extraurbano (l cada 100 km)
Gasóleo	Peugeot 208 3p Like 1.6 BlueHDi 75 (2018)	12560	171	13.3	4.2	3
Gasóleo + start/stop	Dacia Sandero Ambiance dCi 55 kW (75 CV) (2016)	9096	164	14.36	3.7	3.4
Gasóleo + start/stop	Renault Clio Limited Energy dCi 55 kW (75 CV) (2016)	15477	168	14.3	3.5	3.1
Gasóleo + start/stop	Seat Ibiza 1.6 TDI 59 kW (80 CV) Start&Stop Reference Plus (2018)	15580	172	13.3	4.5	3.4
Gasóleo + start/stop	Nissan Micra 1.5 dCi 66 kW (90 CV) S&S Acenta (2018)	19150	179	11.9	4.8	3.6
Gasóleo + start/stop	Skoda Scala Concept 1.7 CRDi VGT 104 kW (141 CV) Eco-Dynamics (2017)	22487	203	10	5.1	3.7
Gasóleo + start/stop	Skoda Octavia 2.0 TDI 110 kW (150 CV) DSG Like (2017)	26032	215	8.5	5.2	4.2
Gasóleo + start/stop	Alfa Romeo Giulietta 2.0 JTD 150 CV Super (2016)	27060	210	8.8	5	3.7
Gasóleo	Peugeot Mégane Berlina GT Energy dCi 120 kW (165 CV) EDC (2018)	28565	214	8.8	5.1	4.3
Gasóleo + start/stop	Ford Mondeo Berlina ST-Line 2.0 TDCi 132 kW (180 CV) PowerShift (2018)	35142	213	8.06	5.9	4.3
Gasóleo + start/stop	Mercedes-Benz CLS 300 d Coupé (2018)	70650	250	6.4	6.5	4.8
Gasóleo + start/stop	BMW 430d Gran Coupé (2017)	54550	250	5.6	5.9	4.6
Gasóleo + start/stop	BMW 730d (2015)	97450	250	6.1	5.5	4.2
Gasóleo + start/stop	Audi A4 3.0 TDI 200 kW (272 CV) quattro tiptronic 8 vel. (2015)	53590	250	5.3	5.4	4.6
Gasóleo + start/stop	Audi A6 5.0 TDI quattro tiptronic (2018)	64660	250	5.5	6.2	5.2
Gasóleo + start/stop	BMW 540d xDrive Berlina (2018)	71300	250	4.7	ND	ND
Gasóleo + start/stop	Mercedes-Benz S 400 d 4MATIC (2017)	107000	250	5.2	6.9	5
Gasóleo + start/stop	BMW 750d xDrive (2017)	131650	250	4.6	6.9	5.3

Combustible (gasolina)	Modelo	Precio (€)	Velocidad máxima (km/h)	Aceleración 0-100 km/h (s)	Consumo urbano (l cada 100 km)	Consumo extraurbano (l cada 100 km)
Híbrido	Suzuki Baleno 1.2 DualJet + SHVS GLX (2018)	15255	180	12.3	4.9	4
Híbrido	Toyota Yaris 5p 100H Active (2017)	15600	165	11.8	3.1	3.3
Híbrido	Suzuki Swift 1.0T SHVS GLX (2017)	17370	195	10.6	4.8	4
Híbrido	Toyota Prius 1.8 VVT-i Hybrid (2018)	29990	180	10.6	3.6	3.5
Híbrido	Lexus CT 200h Luxury (2018)	39500	180	10.3	4.7	4.1
Híbrido	Hyundai IONIQ Híbrido 1.6 GDI 6DCT Klass Nav (2018)	23375	185	10.8	3.4	3.6
Híbrido	Mercedes-Benz C 200 Berlina (2018)	44500	239	7.7	7.9	4.9
Híbrido	Ford Mondeo Sedan Vignale HEV 2.0 Híbrido (2018)	39467	187	9.2	4.2	4.9
Híbrido	Lexus ES 300h ECO (2018)	45000	180	8.9	5.1	4.5
Híbrido	Mercedes-Benz E 350 Berlina (2018)	61600	250	5.9	9.2	5.3
Híbrido	Lexus GS 450h Executive (2016)	69800	250	5.9	6.7	5.5
Híbrido	Infiniti Q50 3.5 Hybrid Sport Aut. 7 vel. (2018)	40800	250	5.1	8.2	5.1
Híbrido	Mercedes-Benz CLS 450 4MATIC Coupé (2018)	77400	250	4.8	9.8	6.1
Híbrido	Mercedes-Benz Mercedes-AMG E 53 4MATIC+ Berlina (2018)	103700	250	4.5	11.5	7.1
Híbrido	Mercedes-Benz S 500 (2017)	117100	250	4.8	9.2	5.7

Combustible (gasolina)	Modelo	Precio (€)	Velocidad máxima (km/h)	Aceleración 0-100 km/h (s)	Consumo urbano (l cada 100 km)	Consumo extraurbano (l cada 100 km)
Híbrido Enchufable	Hyundai IONIQ Híbrido-enchufable 1.6 GDI Tecno (2017)	33525	178	10.6	ND	ND
Híbrido Enchufable	Audi A3 Sportback e-tron S tronic 6 vel. (2016)	39450	222	7.6	ND	ND
Híbrido Enchufable	BMW 530e iPerformance Berlina (2017)	62200	235	6.2	ND	ND
Híbrido Enchufable	BMW 740e iPerformance (2016)	103350	250	5.4	ND	ND
Híbrido Enchufable	Volvo S90 T8 Twin Engine AWD Momentum (2018)	72150	250	5.1	ND	ND
Híbrido Enchufable	Porsche Panamera 4 E-Hybrid Executive (2016)	120207	278	4.7	ND	ND
Híbrido Enchufable	Porsche Panamera Turbo S E-Hybrid (2017)	190387	310	3.4	ND	ND

Combustible	Modelo	Precio (€)	Velocidad máxima (km/h)	Aceleración 0-100 km/h (s)	Batería Capacidad (kWh)	Batería Capacidad útil (kWh)
Eléctrico	Peugeot iOn (2016)	20950	130	15.9	16	15.2
Eléctrico	Renault ZOE Life 40 (2016)	27200	135	13.2	ND	41
Eléctrico	Hyundai IONIQ Eléctrico 88 kW (120 CV) Style (2016)	38125	165	9.9	ND	28
Eléctrico	Volkswagen e-Golf (2017)	32520	150	9.6	35.48	ND
Eléctrico	Nissan LEAF 40 kWh N-Connecta (2017)	34850	144	7.9	40	ND
Eléctrico	BMW i3 94Ah (2017)	38,250	150	7.3	33.2	27.2
Eléctrico	BMW i3s 94Ah (2017)	41900	160	6.9	33.2	27.2
Eléctrico	Tesla Model S 75D (2016)	88600	225	4.4	ND	75
Eléctrico	Tesla Model S 100D (2017)	112630	250	4.3	ND	100
Eléctrico	Tesla Model S P100D (2016)	150080	250	2.7	ND	100

Densidad (kg/l)	Energía por cada kg de masa (Kwh/kg)			
0.735	11.86			
Consumo medio (l cada 100 km)	Consumo medio (kWh cada 100 km)	Deposito (l)	Autonomía (km)	Emisiones de CO ₂ (gr/km)
4.3	37.48353	35	814	99
4.9	42.71379	35	714	115
4.6	40.09866	41	891	121
4.4	38.35524	35	795	102
5.3	46.20063	45	849	122
4.9	42.71379	42	857	113
5.9	51.43089	58	983	138
5.2	45.32892	50	962	121
6.6	57.53286	62.5	947	150
6	52.3026	50	833	138
6.3	54.91773	58	921	142
5.5	47.94405	68	1236	126
6.6	57.53286	55	833	154
6.5	56.66115	66	1015	148
6.4	55.78944	58	906	148
9.4	81.94074	90	957	215
10.7	93.27297	68	636	243
11.3	98.50323	80	708	257
Densidad (kg/l)	Energía por cada kg de masa (Kwh/kg)			
0.84	12			
Consumo medio (l cada 100 km)	Consumo medio (kWh cada 100 km)	Deposito (l)	Autonomía (km)	Emisiones de CO ₂ (gr/km)
3.5	30.50985	45	1286	90
3.5	30.50985	50	1429	90
3.3	28.76643	45	1364	85
3.8	33.12498	40	1053	99
4.1	35.74011	41	1000	107
4.2	36.61182	70	1667	110
4.5	39.22695	50	1111	118
4.2	36.61182	60	1429	110
4.6	40.09866	50	1087	120
5.2	45.32892	62.5	1202	138
5.2	45.32892	66	1269	137
5.1	44.45721	57	1118	134
4.7	40.97037	78	1660	124
4.9	42.71379	58	1184	129
5.6	48.81576	73	1304	146
5.7	49.68747	66	1158	149
5.7	49.68747	70	1228	150
5.9	51.43089	78	1322	154
Densidad (kg/l)	Energía por cada kg de masa (Kwh/kg)			
0.735	11.86			
Consumo medio (l cada 100 km)	Consumo medio (kWh cada 100 km)	Deposito (l)	Autonomía (km)	Emisiones de CO ₂ (gr/km)
4.3	37.48353	37	860	99
3.3	28.76643	36	1091	75
4.3	37.48353	37	860	97
3.7	32.25327	43	1162	82
4.4	38.35524	45	1023	101
3.4	29.63814	45	1324	79
6	52.3026	66	1100	136
4.8	41.84208	53	1104	108
4.7	40.97037	50	1064	106
6.7	58.40457	66	985	153
6.1	53.17431	66	1082	141
6.2	54.04602	70	1129	144
7.5	65.37825	80	1067	178
8.7	75.83877	66	759	200
6.9	60.14799	70	1014	157
Densidad (kg/l)	Energía por cada kg de masa (Kwh/kg)			
0.735	11.86			
Consumo medio (l cada 100 km)	Consumo medio (kWh cada 100 km)	Deposito (l)	Autonomía (km)	Emisiones de CO ₂ (gr/km)
1.1	9.58881	45	ND	26
1.6	13.94736	40	ND	36
1.9	16.56249	46	ND	44
2.2	19.17762	46	ND	50
2	17.4342	50	ND	46
2.5	21.79275	80	ND	56
2.9	25.27959	80	ND	66
		COMISIÓN NACIONAL de los MERCADOS		REE (2017)
(5 pasajeros de 80 kg)		Emisiones comercialización Genérica kg de		Emisiones comercialización Endesa kg de Co ₂ por kWh
		0.43		0.284
Consumo medio (kWh cada 100km)	Autonomía Dada por los fabricantes (km)	Emisiones CO ₂ en el vehículo (gr/km)	Emisiones CO ₂ desde la generación de la energía genérica (gr/km)	Emisiones CO ₂ desde la generación de la energía Endesa (gr/km)
14.19	160	0	61.017	40.2996
17.51	300	0	75.293	49.7284
15.09	280	0	64.887	42.8556
16.4	300	0	70.52	46.576
16.46	378	0	70.778	46.7464
15.49	335	0	66.607	43.9916
16.44	320	0	70.692	46.6896
19.06	490	0	81.958	54.1304
19.69	632	0	84.667	55.9196
20.17	613	0	86.731	57.2828

Potencia motor (CV)	Revoluciones potencia máxima (rpm)	Par máximo (Nm)	Revoluciones par máximo (rpm)
68	6000	90	3500
69	5500	102	3000
71	6300	95	3500
75	6200	95	3650
84	6000	122	4000
140	6000	180	3250
147	5000	330	1750
150	5500	250	2500
165	5500	242	2800
179	5650	250	3125
252	5500	370	3050
252	5850	350	3125
254	5500	350	2750
258	5950	370	2900
280	5250	400	2250
549	5875	770	3230
625	6000	750	3800
639	6000	900	3500

Potencia motor (CV)	Revoluciones potencia máxima (rpm)	Par máximo (Nm)	Revoluciones par máximo (rpm)
75	3500	230	1750
75	4000	200	1750
75	4000	200	1750
80	3750	220	1900
90	4000	220	2000
141	4000	340	2125
150	3750	340	2375
150	3750	380	1750
163	4000	380	1750
179	3500	400	2250
245	4200	500	2000
258	4000	560	2250
265	4000	620	2250
272	3750	600	2250
286	3750	620	2625
320	4400	680	2000
340	4000	700	2200
400	4400	760	2500

Combustión				Eléctrico				Potencia Total (CV)	Par total (Nm)	Revoluciones potencia máxima (rpm)	Batería Capacidad (kWh)	Autonomía eléctrica (km)
Potencia motor (CV)	Revoluciones potencia máxima (rpm)	Par máximo (Nm)	Revoluciones par máximo (rpm)	Potencia motor (CV)	Revoluciones potencia máxima (rpm)	Par máximo (Nm)	Revoluciones par máximo (rpm)					
90	6000	120	4400	3	ND	ND	ND	90	120	6000	0.38	ND
75	4800	111	4100	61	ND	169	ND	101	ND	ND	0.94	ND
111	5500	170	2750	3	ND	ND	ND	111	170	5500	0.38	ND
98	5200	142	3600	72	ND	163	ND	122	ND	5200	1.31	ND
99	5200	142	3600	82	ND	207	ND	136	ND	ND	1.31	ND
105	5700	147	4000	44	2500	170	1798	141	265	5700	1.56	ND
184	5950	280	3500	14	ND	160	ND	184	280	5950	ND	ND
140	6000	173	4000	120	ND	240	ND	186	300	6000	1.4	ND
178	5700	221	4400	120	ND	202	ND	218	ND	ND	ND	ND
299	5950	400	3500	14	ND	150	ND	299	400	5950	ND	ND
292	6000	352	4500	200	ND	275	ND	345	ND	ND	1.9	ND
306	6800	350	5000	68	2000	270	1770	364	546	ND	1.4	ND
367	5800	500	2800	22	ND	250	ND	367	500	5800	ND	ND
435	6100	520	3800	22	ND	250	ND	435	520	6100	ND	ND
435	6000	520	3650	22	ND	250	ND	435	520	6000	ND	ND

Combustión				Eléctrico				Potencia Total (CV)	Par total (Nm)	potencia máxima (rpm)	Batería Capacidad (kWh)	Autonomía eléctrica (km)
Potencia motor (CV)	Revoluciones potencia máxima (rpm)	Par máximo (Nm)	Revoluciones par máximo (rpm)	Potencia motor (CV)	Revoluciones potencia máxima (rpm)	Par máximo (Nm)	Revoluciones par máximo (rpm)					
105	5700	147	4000	61	ND	170	ND	141	265	ND	8.9	63
150	5500	250	2500	102	ND	330	ND	204	350	ND	8.8	50
184	5750	290	2800	113	3170	250	ND	252	420	ND	9.2	50
285	5750	400	2975	113	ND	250	ND	326	500	ND	9.2	40
320	5700	400	3800	88	7000	240	3000	408	640	ND	9.2	45
330	5875	450	3375	136	2800	400	2300	462	700	6000	14.1	50
549	5875	770	3230	136	2800	400	2300	680	850	5875	14.1	50

Potencia motor (CV)	Revoluciones potencia máxima (rpm)	Par máximo (Nm)	Revoluciones par máximo (rpm)
67	ND	180	ND
92	ND	225	ND
120	ND	295	ND
136	12000	290	ND
150	9795	320	3283
170	ND	250	ND
Características motor extra			
184	ND	270	ND
262	ND	ND	ND
262	ND	ND	ND
510	ND	ND	ND

Potencia motor (CV)	Revoluciones potencia máxima (rpm)	Par máximo (Nm)	Revoluciones par máximo (rpm)	Potencia Total (CV)	Par total (Nm)	Revoluciones potencia máxima (rpm)
262	ND	ND	ND	262	ND	ND
262	ND	ND	ND	423	660	ND
510	ND	ND	ND	612	967	ND

Tabla 10 Tablas realizadas para la asignatura de Movilidad eléctrica (2018 - 2019) del grado de ingeniería eléctrica de la universidad de Zaragoza, para el trabajo "Comparativa vehículos de bajas emisiones frente a vehículos de combustión interna" realizado por Marcos Meseguer Laborda, Autor de este Trabajo de fin de grado y César Moreno Argüelles en 2018 en la que se definen las características de vehículos ligeros comerciales.

Modelo	Renault 4 TL	Peugeot iOn (2016)	Suzuki Celerio 1.0 GL (2014)	Peugeot 208 3p Like 1.6 BlueHDI 75 (2018)	Suzuki Baleno 1.2 DualJet + SHVS GLX (2018)	Hyundai IONIQ Híbrido-enchufable 1.6 GDI Tecnológico (2017)
Combustible	(Conversión eléctrico)	(Eléctrico)	(Gasolina)	(Gasóleo)	(Híbrido)	(Híbrido Enchufable)
Precio (€)	21736	20950	9190	12560	15255	33525
Velocidad máxima (km/h)	130	130	155	171	180	178
Consumo medio NEDC (kWh cada 100km)	13	14.19	37.48353	30.50985	37.48353	9.58881
Autonomía NEDC (km)	279	160	814	1286	860	280
Emisiones CO2 (gr/km)	46.8316	40.2996	99	90	99	26
Potencia vehículo (CV)	63	67	68	75	90	105
Precio (p.u)	0.648351976	0.6249068	0.274123788	0.374645787	0.455033557	1
Velocidad máxima (p.u)	0.722222222	0.7222222	0.861111111	0.95	1	0.988888889
Consumo medio (p.u)	0.34681899	0.3785663	1	0.813953488	1	0.255813953
Autonomía (p.u)	0.217	0.1244444	0.633074935	1	0.669250646	0.217777778
Emisiones CO2 (p.u)	0.473046465	0.4070667	1	0.909090909	1	0.262626263
Potencia vehículo(p.u)	0.6	0.6380952	0.647619048	0.714285714	0.857142857	1

Tabla 11 Características comparables de modelos de vehículos con similar potencia al vehículo en el que se realizaría la conversión.

Anexo III Modelos de Simulink y “Scripts” de Matlab planteados.

Anexo III.1 Modelos y “Scripts” para el estudio dinámico y energético.

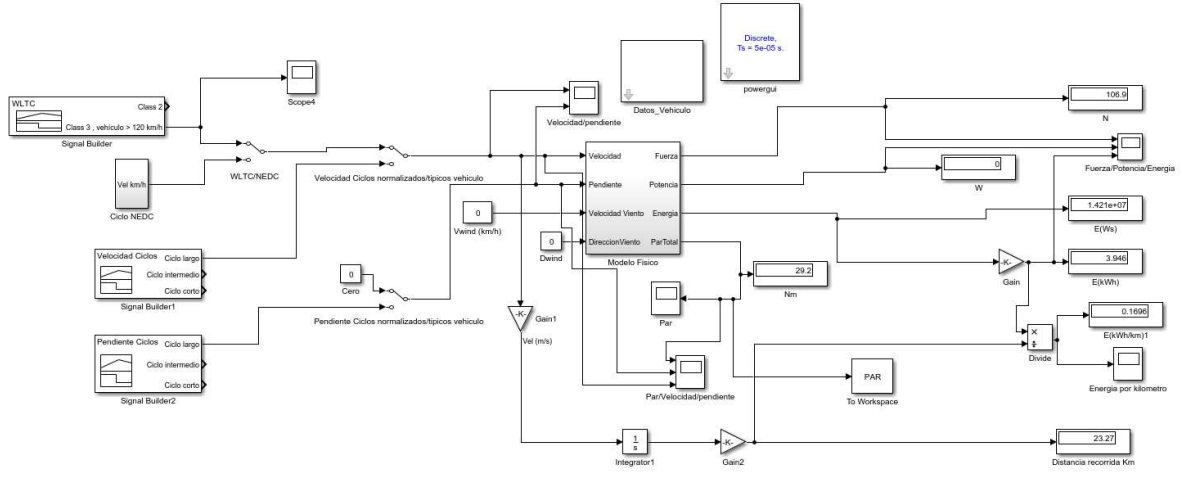


Figura 61 Modelo de Simulink para el estudio energético y dinámico final en Simulink.

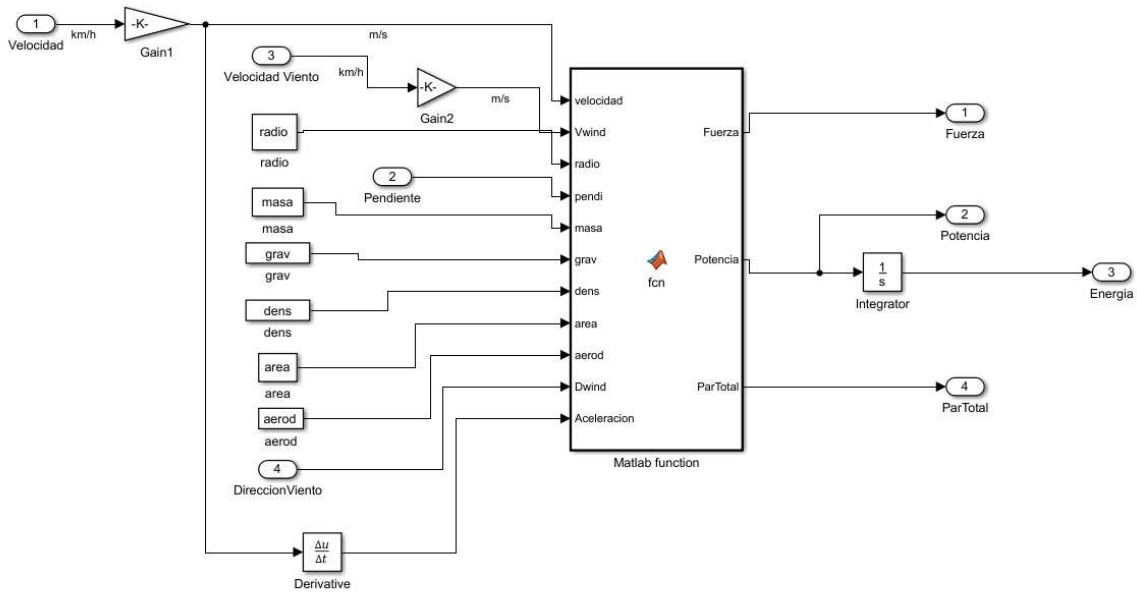


Figura 62 Subsistema del bloque modelo físico en Simulink.

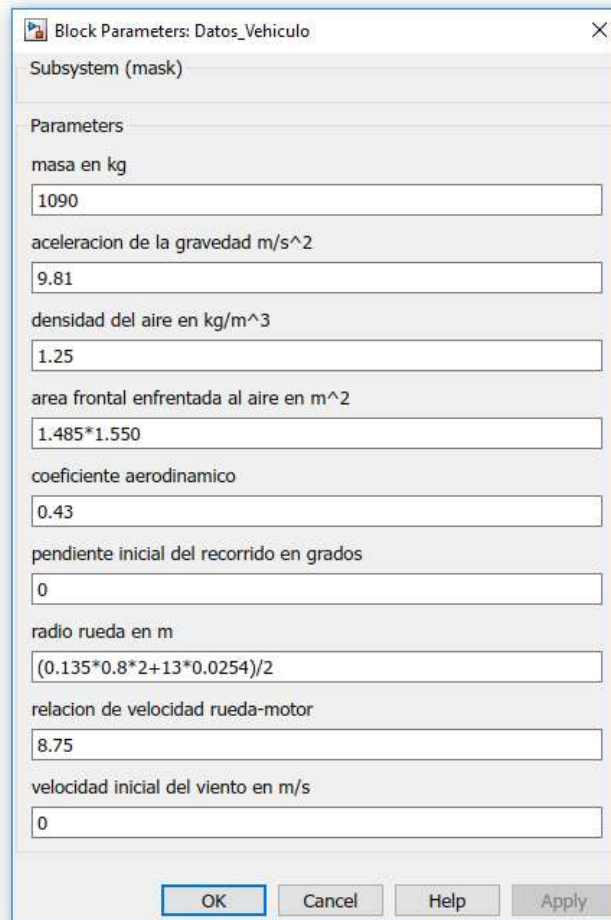


Figura 63 mascara con los datos del vehículo en Simulink.

Type	Prompt	Name
[-] A	%<MaskType>	DescGroupVar
[-] A	%<MaskDescription>	DescTextVar
[-] A	Parameters	ParameterGroupVar
[31] #1	masa en kg	masa_en_kg
[31] #2	aceleracion de la gravedad m/s ²	gravedad
[31] #3	densidad del aire en kg/m ³	densidad
[31] #4	area frontal enfrentada al aire en m ²	area_frontal
[31] #5	coeficiente aerodinamico	coeficiente_aerodinamico
[31] #6	pendiente inicial del recorrido en grados	pendiente_recorrido
[31] #7	radio rueda en m	radio_rueda
[31] #8	relacion de velocidad rueda-motor	realcion_rueda_motor
[31] #9	velocidad inicial del viento en m/s	velcidad_del_viento

Figura 64 "Dialog Box" definido de la máscara en Simulink.

```
masa=masa_en_kg;  
grav=gravedad;  
dens=densidad;  
area=area_frontal;  
aerod=coeficiente_aerodinamico;  
pendi=pendiente_recorrido*2*pi/360;  
radio=radio_rueda;  
G=realcion_rueda_motor;  
Vwind=velcidad_del_viento;  
  
assignin ('base', 'masa', masa);  
assignin ('base', 'grav', grav);  
assignin ('base', 'dens', dens);  
assignin ('base', 'area', area);  
assignin ('base', 'aerod', aerod);  
assignin ('base', 'pendi', pendi);  
assignin ('base', 'radio', radio);  
assignin ('base', 'G', G);  
assignin ('base', 'Vwind', Vwind);
```

Figura 65 Código para la inicialización de variables a través de la máscara en Simulink.

```

function [Fuerza,Potencia,ParTotal] = fcn(velocidad,Vwind,radio,
pendi, masa, grav, dens, area, aerod,Dwind,Aceleracion)

rozam = 0.01*(1+(3.6/100)*velocidad);

Frr = rozam*masa*grav;

if Aceleracion < 0

    Fac1 = masa*Aceleracion*0.4;
else
    Fac1 = masa*Aceleracion;
end

Faca = 0.05*Fac1;

if Dwind == 0
    Fad = 0.5*dens*area*aerod*(velocidad+Vwind)^2;
else
    Fad = 0.5*dens*area*aerod*(velocidad-Vwind)^2;
end

if velocidad > 0
    Fas = masa*grav*sin(deg2rad(pendi));
else
    Fas = 0;
end

Fuerza = Frr+Fad+Fas+Fac1+Faca;
ParTotal = Fuerza*radio;
Potencia = Fuerza*velocidad;
    
```

Figura 66 función del bloque "MATLAB function" en "Script" de Matlab desde Simulink.

Anexo III.2 Modelo para estimar tiempos de carga de la batería.

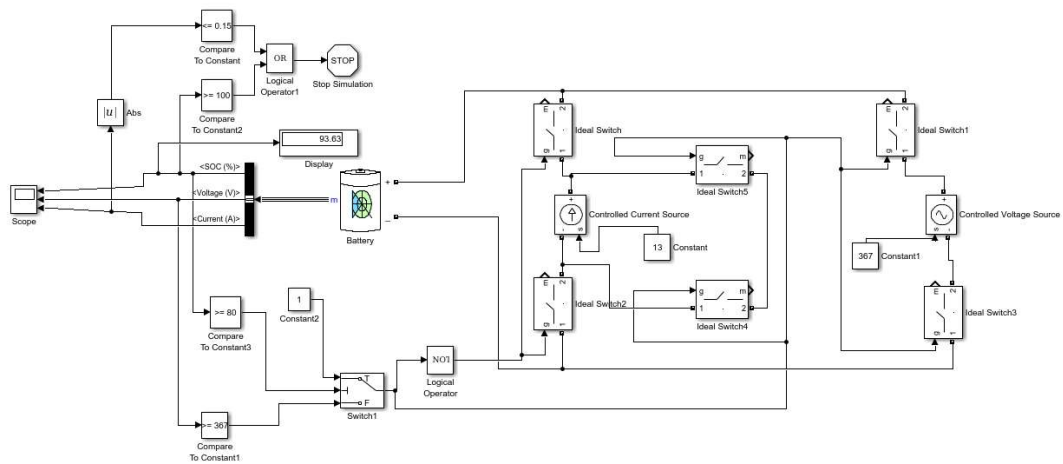


Figura 67 Modelo de la batería para la estimación del tiempo de carga lento, moderado y rápido en Simulink.

Anexo III.3 Modelo del motor+Inversor+Convertidor+Batería.

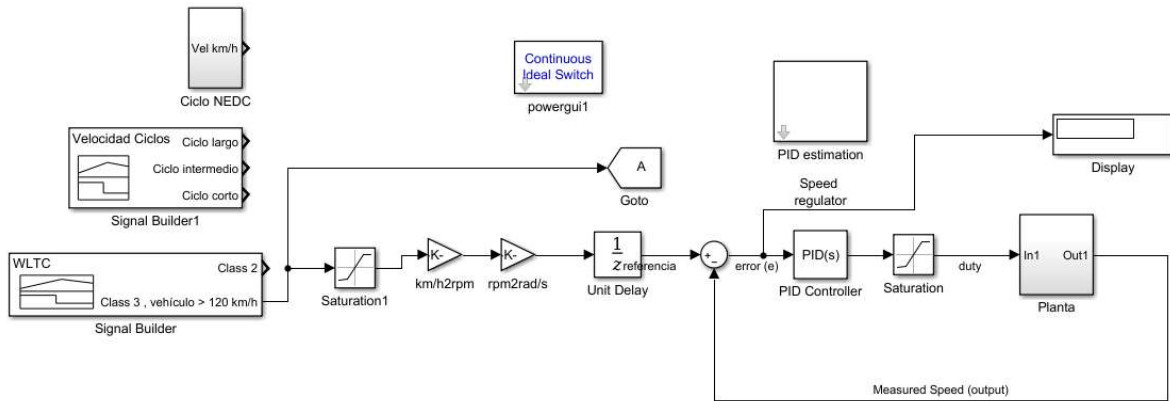


Figura 68 Modelo del controlador PID con la referencia en Simulink.

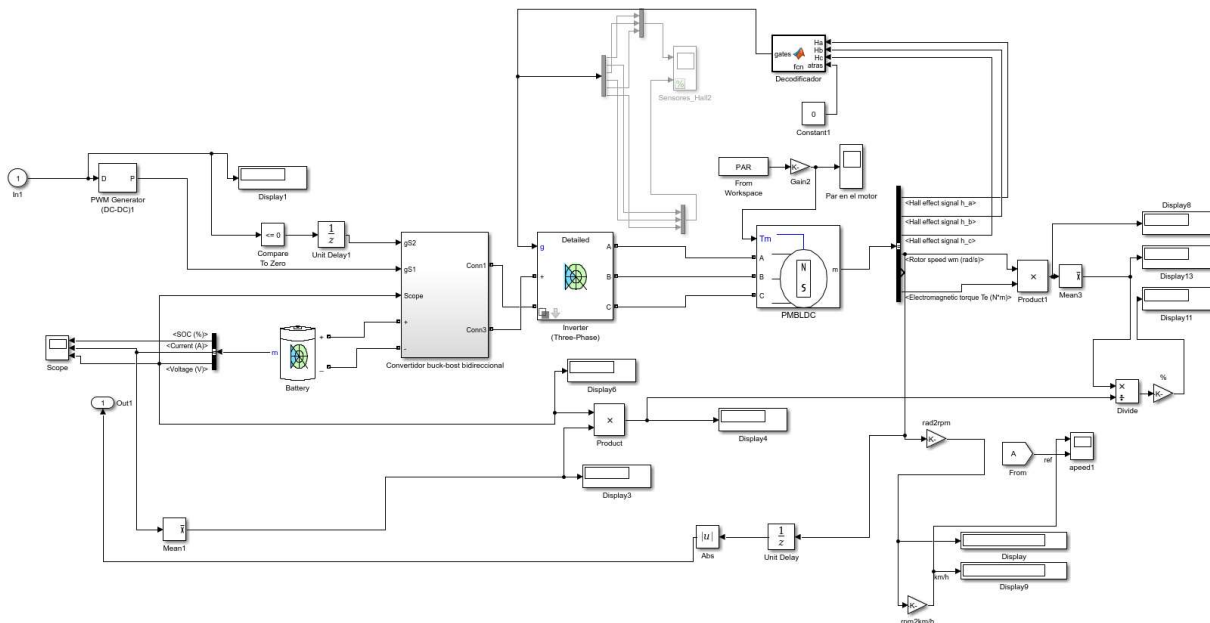


Figura 69 Bloque planta donde se encuentran el modelo de la batería, el convertidor y el motor en Simulink.

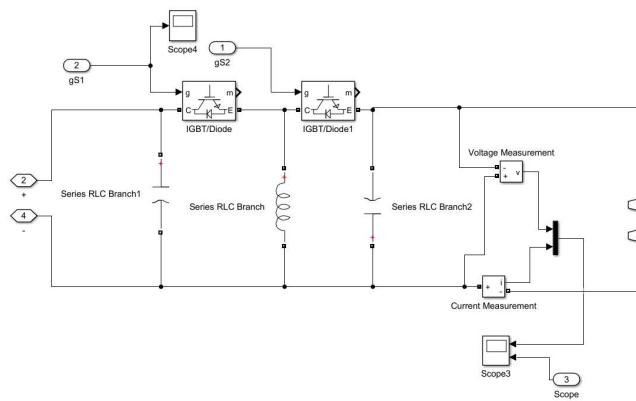


Figura 70 Modelo del convertidor, bloque Buck-Boost bidireccional en Simulink.

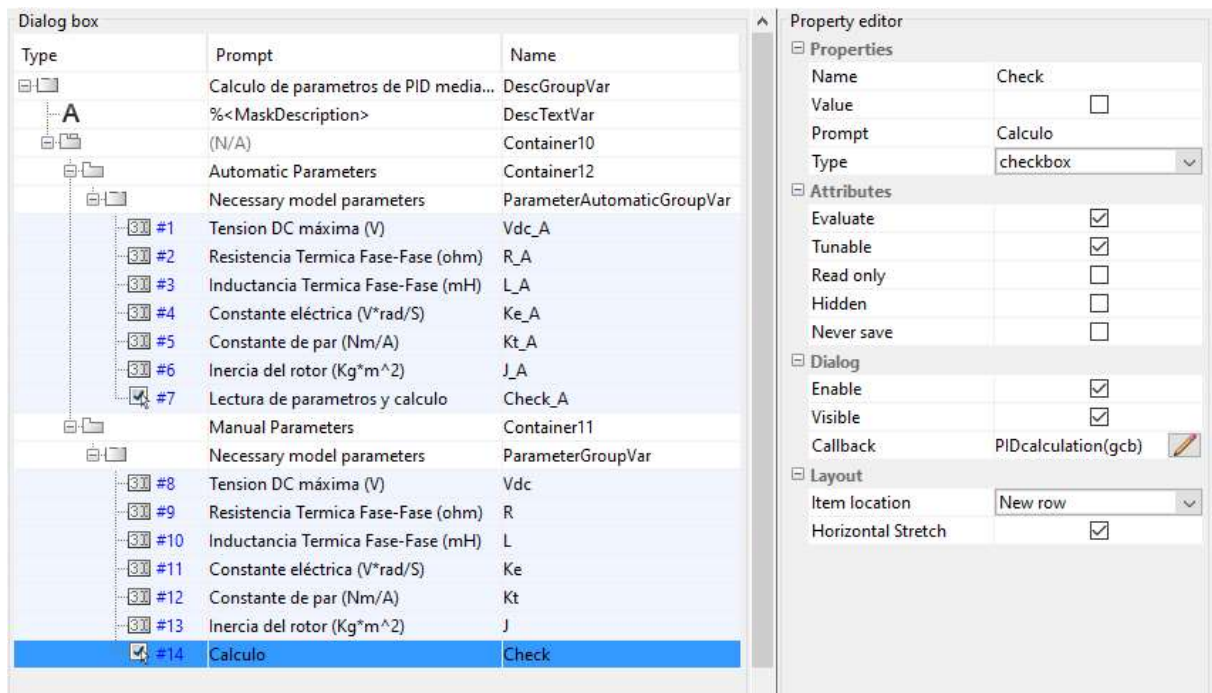


Figura 71 "Dialog Box" de la máscara PID estimation en Simulink.

```

function PIDcalculation(block);
if strcmp(get_param(block, 'check'), 'on') == 1
    set_param(block, 'check', 'off')

    J = str2num(get_param(block, 'J'));
    Ke = str2num(get_param(block, 'Ke'));
    R = str2num(get_param(block, 'R'));
    L = str2num(get_param(block, 'L'));
    Vdc = str2num(get_param(block, 'Vdc'));
    Kt = str2num(get_param(block, 'Kt'));

    te = (L*1e-3)/(3*R); % Electrical torque (s)
    tk = (3*R*J)/(Ke*Kt); % Back emf constant (V*s/rad)

    G = tf(Vdc/Ke, [tk*te tk 1]); % Calculo de la funcion de
transferencia
Gstring = evalc('G');

    str=sprintf([
        'Funcion de transferencia con parametros
introducidos manualmente:',...
        '\n',Gstring,...
    ]);
    msgbox(str,'Planta');
    pidTuner(G,'PIDF');
end

if strcmp(get_param(block, 'check_A'), 'on') == 1
    set_param(block, 'check_A', 'off')

    PMBLDC =
getSimulinkBlockHandle('DC_brushless_PWM_Pruebasv3/Planta/PMBLDC');
    
```

```

VdcSource =
getSimulinkBlockHandle('DC_brushless_PWM_Pruebasv3/Planta/DCSource')
;

R = str2num(get_param(PMBLDC, 'Resistance'));
L = str2num(get_param(PMBLDC, 'Inductance'));
Mechanical = str2num(get_param(PMBLDC, 'Mechanical'));
Ke = str2num(get_param(PMBLDC, 'VoltageCst'));
Kt = str2num(get_param(PMBLDC, 'TorqueCst'));
Vdc = str2num(get_param(VdcSource, 'Amplitude'));

R = R*2;
L = L*1000;
Ke = Ke*60/(sqrt(2)*2*pi*1000);
J = Mechanical(1,1);

te = (L*1e-3)/(3*R); % Electrical torque (s)
tk = (3*R*J)/(Ke*Kt); % Back emf constant (V*s/rad)

G = tf(Vdc/Ke,[tk*te tk 1]); % Calculo de la funcion de
transferencia

Gstring = evalc('G');

str=sprintf([
'Funcion de transferencia con parametros leidos
Automaticamente:',...
'\n',Gstring,...
]);
msgbox(str,'Planta');
pidTuner(G,'PIDF');

set_param(block,'Kt_A',num2str(Kt));
set_param(block,'Ke_A',num2str(Ke));
set_param(block,'J_A',num2str(J));
set_param(block,'R_A',num2str(R));
set_param(block,'L_A',num2str(L));
set_param(block,'Vdc_A',num2str(Vdc));

end

end

```

Figura 72 "Script" de la función PIDCalculation, "Script" de Matlab.

```

function gates = fcn(Ha,Hb,Hc,atras)

switch atrás % Selecciona el sentido de giro adelante = 0 / atrás =
1

    case 1

        if (Ha==0) && (Hb==0) && (Hc==1)      % Vbc

            gates = [0 0 1 0 0 1];          % Q3,Q6

        elseif (Ha==0) && (Hb==1) && (Hc==0)    % Vab

            gates = [1 0 0 1 0 0];          % Q1,Q4

        elseif (Ha==0) && (Hb==1) && (Hc==1)    % Vac

            gates = [1 0 0 0 0 1];          % Q1,Q6

        elseif (Ha==1) && (Hb==0) && (Hc==0)    % Vca

            gates = [0 1 0 0 1 0];          % Q5,Q2

        elseif (Ha==1) && (Hb==0) && (Hc==1)    % Vba

            gates = [0 1 1 0 0 0];          % Q3,Q2

        elseif (Ha==1) && (Hb==1) && (Hc==0)    % Vcb

            gates = [0 0 0 1 1 0];          % Q5,Q4

        else

            gates = [0 0 0 0 0 0]; % Evita alimentar el motor en
            caso de fallo

        end

    case 0

        if (Ha==0) && (Hb==0) && (Hc==1)      % Vcb

            gates = [0 0 0 1 1 0];          % Q5,Q4

        elseif (Ha==0) && (Hb==1) && (Hc==0)    % Vba

            gates = [0 1 1 0 0 0];          % Q3,Q2

        elseif (Ha==0) && (Hb==1) && (Hc==1)    % Vca

            gates = [0 1 0 0 1 0];          % Q5,Q2

        elseif (Ha==1) && (Hb==0) && (Hc==0)    % Vac

            gates = [1 0 0 0 0 1];          % Q1,Q6

```

```
elseif (Ha==1) && (Hb==0) && (Hc==1) % Vab
    gates = [1 0 0 1 0 0]; % Q1,Q4
elseif (Ha==1) && (Hb==1) && (Hc==0) % Vbc
    gates = [0 0 1 0 0 1]; % Q3,Q6
else
    gates = [0 0 0 0 0 0];
end
otherwise
    gates = [0 0 0 0 0 0]; % Evita alimentar el motor en caso de
fallo
end
end
```

Figura 73 función Decodificador realizada mediante "Matalab-function", en "Script" de Matlab desde Simulink